博　士　論　文

切り花ギクに利用可能な黄色LEDパルス光を用いた害虫防除技術の開発

平成25年9月

石　倉　　聡

岡　山　大　学　大　学　院

自　然　科　学　研　究　科

目　次

緒言・・ 1

第１章　人工光に対する切り花ギクの開花反応特性およびヤガ類成虫の視覚特性・・・ 5
第１節　人工光に対する切り花ギクの開花反応特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
第１項　光質に対する開花反応特性（LED）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
第２項　黄色蛍光灯と黄色蛍光 LED との比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ １０
第３項　白熱電球と同等の開花抑制作用が得られる放射照度・・・・・・・・・・・・ １８
第２節　人工光に対するオオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の視覚特性・・・・ ２３
第３節　黄色パルス光とキクの開花反応特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ２９
第１項　黄色パルス光のデューティー比とキクの開花反応特性・・・・・・・・・・・ ２９
第２項　黄色パルス光の放射照度とキクの開花反応特性・・・・・・・・・・・・・・・ ３２
第３項　黄色パルス光の点灯方式とキクの開花反応特性・・・・・・・・・・・・・・・ ６５
第２章　切り花ギク生産における防蛾照明技術の実際・・・・・・・・・・・・・・・・・ ７３
第１節　屋外での寄生虫数の低減効果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ７３
第２節　現地実証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ７５
第１項　ヤガ類の被害防止効果と誘引虫数の低減効果・・・・・・・・・・・・・・・・ ７５
第２項　開花遅延の回避・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ８０

第３章　総括・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ８６

謝辞・・ ８８

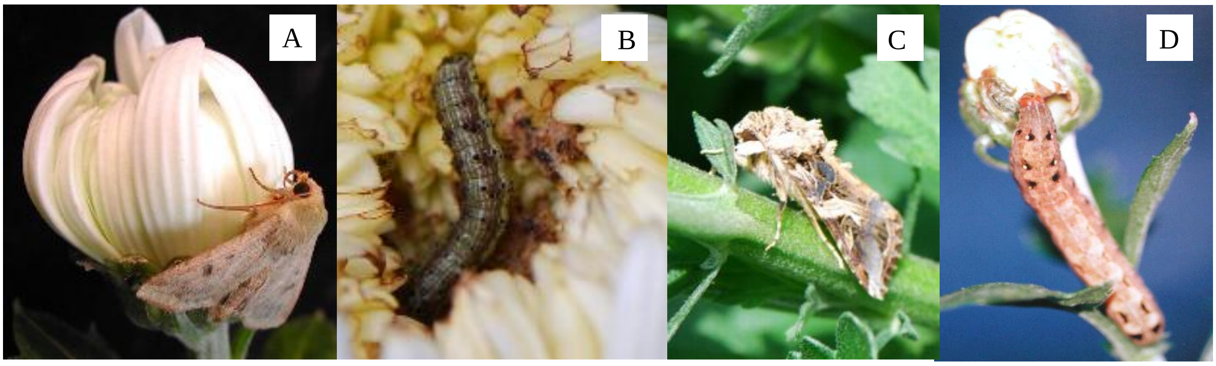
引用文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ９０

緒　言

我が国の主要花きである切り花ギクは，国内での流通量が最も多い切り花であり，平成 24 年のキクの作付面積は 5,230 ha，出荷量は 15 億 9,500 万本である（農林水産省，2013b）．オオタバコガ *Helicoverpa armigera*（Hübner）やハスモンヨトウ *Spodoptera litura*（Fabricius）などのヤガ類（第 1 図）によるキクの被害額に関する正確な統計資料は見あたらないが，平成 6 年に広島県で記録されたヤガ類激発時のキクの被害率 60%（未発表）を，ヤガ類による被害が特に問題となる時期（7～10 月）の全国主要卸売市場における平成 20 年産の国内産切り花ギクの卸売価額 269 億円（農林水産省，2013a）に乗じて，わが国全体の被害額を算出した場合，その額は約 160 億円に及ぶものと試算され（石倉ら，2010），これを早急に解決する必要がある．

害虫防除手段のうち，現在でもその主流である化学合成農薬の使用は，あらゆる農作物の生産において一定の成果を上げてきた．ところが，花き，野菜を問わず多くの種類の農作物を加害するオオタバコガおよびハスモンヨトウなどのヤガ類は，市販されている多くの化学合成農薬に対して薬剤抵抗性を獲得している（遠藤ら，2000；小野本ら，1996；染谷・清水，1997）とされ，防除が難しく，難防除害虫として扱われている．さらに，これらのヤガ類は夜行性であるために昼間は見つけにくいうえに，キクやカーネーションなどでは，幼虫が一度花蕾に潜り込んでしまうと，化学合成農薬がかかりにくいことも，防除を難しくしている原因となっている．このため，生産現場では化学合成農薬に替わる物理的防除法の確立が望まれており，その代替防除法（本田，2010）は，農作物に対して，より高い安全性を求めはじめた多くの消費者からも支持されつつある．現在は黄色蛍光灯を用いたヤガ類に対する防蛾灯の事例に見られるように，露地および施設栽培において，人工光源を利用した物理的な防除装置が開発され，その防除効果が報告されている（平間・松井，2007；本田，2010；伊澤ら，2000；石倉，2000；那波・向阪，1995；田澤，2001；内田，2002；八瀬ら，1997）．ヤガ類に対する夜間照明の利用（平間・松井，2007；本田，2010；伊澤ら，2000；那波・向阪，1995；田澤，2001；内田，2002；内田ら，1978）は，化学合成農薬の散布労力を軽減するとともに農薬の使用量を削減し，しかも，薬剤抵抗性を有する害虫の出現を防止する環境配慮型の害虫防除法の 1 つでもある．

カーネーションやバラでは，物理的防除法（八瀬ら，1997）として，産卵のため圃場へ飛来するヤガ類の成虫に対して，高い防除効果がある黄色蛍光灯による夜間照明の利用が進んでいる．防蛾に黄色域の光が用いられるのは，昆虫の誘引力が極めて弱いにもかかわらず明適応所要時間が短いことであり，光照射による行動抑制に用いる光源として適しているという理由（江村, 2003）による．オオタバコガおよびハスモンヨトウなどのヤガ類の防除における黄色蛍光灯による照明は，具体的には，これらのヤガ類成虫の飛来を防止して産卵を防ぐことにより，農作物へ直接的な被害を及ぼす次世代の幼虫を減少させる効果（八瀬，2003）があるとされている．しかし，質的短日植物である秋ギクでは，その照明によって開花時期が著しく遅れることに加えて，切り花



第 1-1 図　切り花ギクに甚大な被害を及ぼしているヤガ類

オオタバコガ（A 成虫，B 幼虫），ハスモンヨトウ（C 成虫，D 幼虫）

形質が低下する（石倉ら，2000；山中ら，1997）ため，植物体に向けて光を照射するような利用はできなかった．さらに，連続光である黄色蛍光灯の照明は，ヤガ類に「慣れ現象」を引き起こし，防除効果が低下する恐れがあると指摘されている（平間ら，2002 ; 2007 ; 平間・松井，2007）．従って，短日植物である切り花ギクの生産においても，キクの開花へ悪影響を及ぼさず，かつ，持続性の高い防除効果が得られる条件を見いだすことができれば，夜間照明を利用してヤガ類の被害を防ぐことが可能になると考えられる．

石倉・村上（2006）は，Cathey・Borthwick（1961）による白熱電球を用いたサイクリックライティング関連実験に基づいて，秋ギクの電照抑制栽培では，赤色光を放射する発光ダイオード（Light Emitting Diode，以下 LED と略記する）を用いた間欠照明によって明期と暗期を繰り返した場合, 明暗比率が異なることによって開花抑制効果に差があることを見いだした. 具体的には,明期はすべて 1 秒とし，0（連続光），1，2，5 および 9 秒の異なる暗期を設定して，明期と暗期を繰り返す夜間照明を行った場合，暗期の設定値が大きいほど開花への影響が小さくなることを確認した．このことは，相対分光放射照度が異なるものの，黄色光を用いる防蛾用の照明においても明暗比率（時間構造）を調節することによって，秋ギクの開花への影響を制御できる可能性を示唆している．なお，LED を光源として用いるのは，特定波長を照射できることに加えて，一般的な LED の応答速度が 1 μs（10^{-6} 秒）程度（谷，2000）と極めて速く，パルス光の照射に適しているためである．

LED を用いて光の点滅する頻度を徐々に高めると，実際は点滅していても連続光に見える．このとき，連続光に見え始める限界の頻度は，“ちらつき光の臨界融合頻度”（江口，1995）と呼ばれている．ちらつき光の臨界融合頻度を超える周波数で光を与えた場合，ヤガ類は光の点滅を視認できず，連続光として視認すると考えられている（江口，1995 ; Nakagawa・Eguchi，1994）．つまり，ヤガ類に「慣れ現象」を起こさせることなく，持続性の高い防除効果を得ることを目的として，点滅光（パルス光）として常時視認させるためには，ちらつき光の臨界融合頻度を超えない周波数で照明する必要があると考えられる．これに基づいて，平間ら（2002）は，ヤガ類成虫の光受容体である複眼に対し，AlGaInP 系の黄色 LED を用いてパルス光を照射した際に誘発される微弱な電圧（網膜電位：Electro-Retino Gram，以下 ERG と略記する）を解析し，デューティー比が 50%に相当する明期と暗期との比率が 1 : 1 の場合，オオタバコガとハスモンヨトウが点滅光として視認できるのは，パルス光の明期と暗期がともに約 10 ms（10^{-2} 秒）が限界であると報告している．なお，デューティー比とは，パルス光の有する時間構造である明期と暗期の比率を表しており，以下の式で示すことができる．

$$\text{デューティー比} = \frac{\text{明期}}{\text{明期} + \text{暗期}} \times 100$$

さらに，これに基づいて設定した明期と暗期がともに 10 ms のパルス光は，キャベツ圃場に浸入してくるヤガ類に対して高い防除効果を発揮する（平間ら，2007）ことを明らかにしている．しかしながら，パルス光の明暗比率が 1 : 1 以外の場合，ヤガ類複眼への刺激力や，十分な刺激力を得るために必要となるパルス光の放射照度について検討した報告は見られない. また, 黄色 LED を用いた防蛾用のパルス光と短日植物である切り花ギクの開花反応との関係を検討した報告は見られない.

そこで，本研究では，典型的な短日植物である切り花ギクの生産においても適用できる防蛾照明技術の開発を目的として，「開花遅延の回避」と「防蛾効果の発現」という二律背反する課題を同時に解決するために必要となる照明条件を探索した. 具体的には, まず第 1 章第 1 節において，人工光源を用いた従来の連続光について，防蛾に有効とされる黄色光を中心に，その他数種の光の波長および放射照度が切り花ギクの発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響を検討し，光の波長が有する開花抑制作用の強弱を明らかにしようと試みた．次に第 2 節では，網膜電位計測システムにより，オオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の複眼に対する黄色パルス光による刺激力を，異なる放射照度を設定して解析した．続く第 3 節では，ヤガ類の視覚特性の解析実験と同様な処理区を設定し，切り花の形状が異なる輪ギク，小ギクおよびスプレーギクの発蕾，開花および切り花形質に及ぼす黄色パルス光の影響を, 数種の異なる品種を供試して調査した. 加えて, 一般照明用の LED シーリングライトなどでは, すでに実用化されている効率的な調光技術である Pulse Width Modulation（パルス幅変調，以下 PWM と略記する）点灯下において発蕾に及ぼす影響を調査し，キクの成長に合わせた節電管理実現の可能性を検討した．さらに，防蛾照明技術を具現化する LED ランプを圃場へ導入する際に想定される 2 つの点灯方式（同期および非同期点灯）による影響について調査した．続いて第 2 章においては，第 1 章で開発した防蛾照明技術について，実際に露地ギク栽培へ導入した場合の適用性を防蛾効果と開花へ影響の両面から検証した.

なお，本研究においては，ある受光面でのスペクトロラジオメータによる分光放射照度の計測結果を用い，供試光源がどのような波長を，どのような割合で放射しているかを示した．このため，本稿で示される分光放射照度の計測結果に関する図中の縦軸は,「相対分光放射照度」と表記した．また，本研究において，論文中に特に記載のない場合の照射照度の測定には，400～800 nm の波長域の分光応答度がフラットレスポンスであるスペクトロラジオメータ（センサ RW-3703- 4 および本体 X1-1，Gigahertz-Optik 社製）を用いた．使用したスペクトロラジオメータは，設定したパルス光の点滅速度に追従（応答）できないため，パルス光の放射照度を測定できない．そこで，各実験での放射照度は供試した LED を一時的に連続点灯した状態で測定した．一方，黄色パルス光は，供試した LED を電子制御により短時間で繰り返し点滅させることで発生する．このときの点灯時間（明期）と消灯時間（暗期）を黄色パルス光の時間構造と定義し，本研究では明期／暗期として表記した．さらに，切り花ギクに関する調査では，蕾が視認できた日を発蕾日とした．また，輪ギクについては，開花のステージが「2」(フローリスト編集部，1983）となった日

を開花日とし，小ギクおよびスプレーギクについては，花房の中で開花が最も早い頭花の舌状花が開き始め，花芯が視認でき，開花のステージが「2」（フローリスト編集部，1983）となった日を開花日とした．本研究では，ハウス内気温の管理など，自然に任せ，温風暖房機などによる制御を行わない場合を「なりゆきの温度管理」として表記した．

第1章　人工光に対する切り花ギクの開花反応特性およびヤガ類成虫の視覚特性

第1節　人工光に対する切り花ギクの開花反応特性

赤色光は，キクの開花抑制作用に優れる波長（Cathey・Borthwick，1957 ; 1964）とされている．このことから，近年では，キクの開花抑制を目的として使用されてきた白熱電球の代替光源の 1 つとして，赤色光を放射するキクの電照用 LED 電球が市販されている．ところが，赤色光は，ヤガ類成虫の複眼に対して刺激力が小さく（平間ら，2002 ; 藪，1999），ヤガ類成虫にとっては視認しにくい波長の 1 つとされている．このため，防蛾を目的とする照明においては，赤色光を利用することができない．

一方，オオタバコガおよびハスモンヨトウなどのヤガ類に対する夜間照明を利用した物理的防除法においては，580 nm 付近に最大波長を有する黄色蛍光灯による照明の有効性（田中ら，1992 ; 矢野，1992 ; 八瀬ら，1996 ; 1997）が報告されている．しかしながら，キクに対し，黄色光自体がどの程度の開花抑制作用を有するのかを，他の光の波長と比較検討した報告は少ない．

そこで，本節では，LED を含む相対分光放射照度の異なる各種光源を供試してキクを夜間照明した場合の影響について検討した．

第1項　光質に対する開花反応特性（LED）

プリズムを使用しても，それ以上分光できない光は，単色光と呼ばれている．本項では，単色光に近い光を放射でき，なおかつ，異なる相対分光放射照度を有する 5 種類の LED を，黄色 LED を中心として選定した．次に，キクに対し，黄色光の有する開花抑制作用が，他の波長の光と比較して，どの程度であるかを明らかにするため，選定した LED を用いて，波長とその放射照度が発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響を比較調査した．

1　材料および方法

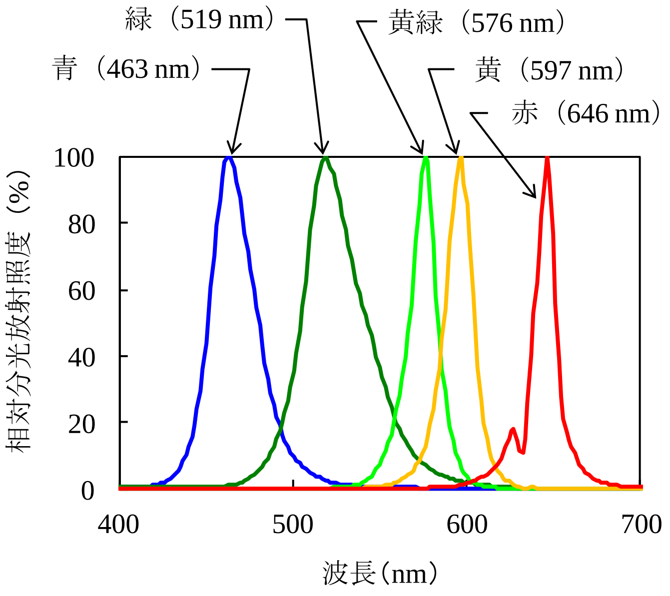
秋ギク‘神馬’を 2007 年 10 月 30 日に挿し芽し，11 月 20 日に容量 6.2 liter（D 15 cm×W 32 cm×H 13 cm）のプランターへ 3 株ずつ定植し，日最低気温が 15℃を下回らないように管理したプラスチックハウス内で無摘心栽培した．培地は，沖積土：ピートモスを 3：1（V/V）で混合して

作成し，定植 7 日後に窒素：リン酸：カリが 7：6：6 の有機質複合肥料（いい花つくろう 766，広島県製肥社製）を 1 プランター当たり 9 g 施与した．供試光源の相対分光放射照度を第 1-2 図に示した．供試光源には，463（青色），519（緑色），576（黄緑色），597（黄色）および 646 nm（赤色）をピーク発光波長とする 5 種類の LED を実装した LED モジュール（以下，モジュールと略記する）を用いた．各モジュールは，45 cm × 45 cm のパネル中央に，発光面が下向きになるように固定し，キク供試個体上に設置した（第 1-3 図）．キクの茎頂付近における放射照度は，便宜的に 10，50 および 100 mW･m^{-2} の 3 水準とした．キクの成長に合わせ，LED モジュールから茎頂までの距離が約 90 cm となるように，定植 8 日後から実験終了まで毎週 1 回調整し，所定の放射照度を確保した．対照として定植日以降を自然日長下で管理する無処理区を設定し，各処理区はピーク発光波長と放射照度を組み合わせた 15 処理区とした．区制は 1 区 3 プランターで 3 反復とした．実験期間中は，無処理区を除き，定植日から 2008 年 1 月 7 日までの 48 日間，毎日 22:00〜2:00 に暗期中断を行い，1 月 7 日以降は，自然日長下で管理した．なお，夜間は，各処理区間を遮光フィルムで仕切ることで照射光の干渉を防止した．発蕾日および開花日を調査し，長日処理終了日から発蕾日および開花日までの日数を，それぞれ発蕾所要日数および到花日数とした．また，開花日に地際から採花し，切り花形質を調査した．

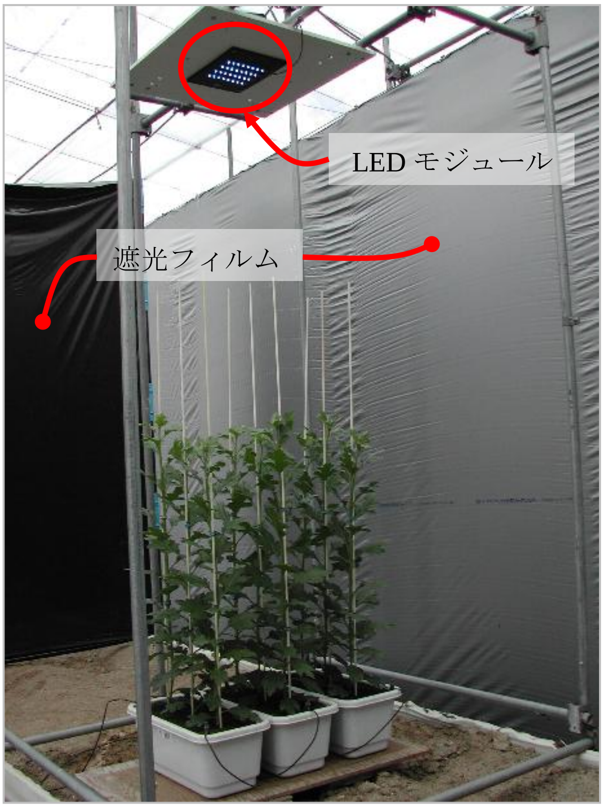
2 結 果

供試光源を用いて異なる放射照度下で暗期中断した場合の秋ギク‘神馬’の発蕾所要日数を第 1-4 図に，供試光源による暗期中断の終了日から 8 日後の 10 mW･m^{-2} 区における生育状況を第 1-5 図に示した．発蕾所要日数は，青色光を照射すると，無処理と同様に，すべての処理区で放射照度に関わらず 0 日未満となった．緑色光を照射すると，いずれの放射照度においても 0 日未満となったが，放射照度が大きい区ほど発蕾所要日数は増加する傾向が見られた．黄緑色光を照射すると，10 mW･m^{-2} 区のみ 0 日未満となったが，50 mW･m^{-2} 区で 14 日，100 mW･m^{-2} 区では 21 日となった．黄色光を照射すると，10 mW･m^{-2} 区では 0 日未満となったが，50 mW･m^{-2} 区で 20 日，100 mW･m^{-2} 区では 24 日となった．赤色光を照射すると，すべての処理区で 0 日より大きくなり，10 mW･m^{-2} 区で 3 日， 50 mW･m^{-2} 区で 18 日，100 mW･m^{-2} 区では 25 日となった．

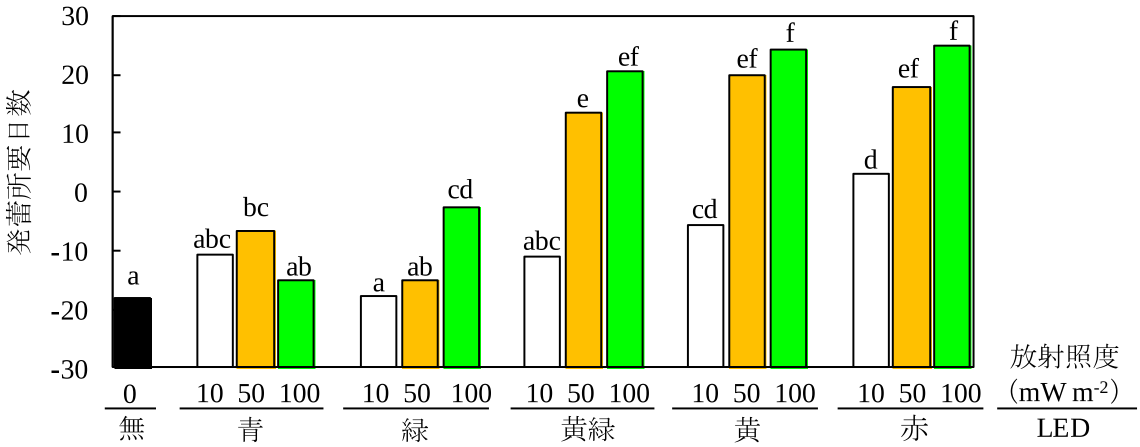
第 1-1 表に，異なる波長および放射照度で暗期中断した場合の秋ギク‘神馬’の切り花形質を示した．切り花長は，青色光照射では，無処理区と同様に，放射照度に関わらず 90 cm 未満となった．緑色光照射では，いずれの放射照度においても 90 cm 未満となったが，放射照度が大きいほど切り花長が増加する傾向が見られた．黄緑色光照射では，10 mW･m^{-2} 区のみ 90 cm 未満となったが，50 mW･m^{-2} 区で 103 cm，100 mW･m^{-2} 区では 110 cm となった．黄色光照射では，10 mW･m^{-2} 区で 90 cm 未満となったが，50 mW･m^{-2} 区で 107 cm，100 mW･m^{-2} 区では 112 cm となった．赤色光照射では，10 mW･m^{-2} 区で 90 cm 未満となったが，50 mW･m^{-2} 区で 110 cm，100 mW･m^{-2} 区では 115 cm となった．切り花重および切り花節数は，切り花長とほぼ同様な傾向を示した．やなぎ



第 1-2 図　実験に供試した 5 種類の LED の相対分光放射照度
（　）内はピーク発光波長を示す



第 1-3 図　容量 6.2L のプランターに植え付けられた秋ギク‘神馬’と 45 cm × 45 cm のパネル中央に固定された LED モジュール



第 1-4 図　異なる相対分光放射照度を有する 5 種類の LED を用いた暗期中断時の放射照度が秋ギク‘神馬’の発蕾所要日数に及ぼす影響

発蕾所要日数は，暗期中断を終了した 2008 年 1 月 7 日から発蕾日までの日数を示し，1 月 7 日より前に発蕾した場合はマイナス値で示す

図中の異なる英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（*n* = 3）

放射照度は各種 LED 点灯時のキク茎頂付近における値を示す

図中の左下の「$\frac{0}{\text{無}}$」は定植後に自然日長下で管理した無処理区を示す

第 1-5 図　異なる相対分光放射照度を有する 5 種類の LED を用いた暗期中断の終了日から 8 日後の 10 mW･m^{-2} における秋ギク‘神馬’の成育状況

第 1-1 表　異なる相対分光放射照度を有する 5 種類の LED を用いた暗期中断が秋ギク‘神馬’の切り花形質に及ぼす影響

LED	放射照度[z]（mW・m^{-2}）	切り花長（cm）	切り花重（g）	切り花節数	やなぎ葉数	花首長（cm）	花弁の展開異常
無処理	0	45 a[y]	41 a	30 a	1.8 a	3.9 cd	無
青	10	48 a	47 abc	33 ab	1.8 a	3.0 abcd	無
	50	55 ab	52 abcd	37 bc	1.7 a	2.7 abcd	無
	100	46 a	46 abc	31 ab	1.9 a	3.7 cd	無
緑	10	44 a	42 ab	29 a	1.8 a	3.2 bcd	無
	50	53 a	48 abc	32 ab	2.2 a	4.6 d	無
	100	75 c	58 cde	41 cd	2.2 a	3.8 cd	無
黄緑	10	56 ab	54 bcde	35 abc	2.2 a	4.1 cd	無
	50	103 d	78 fg	54 e	1.8 a	2.4 abc	無
	100	110 d	81 g	57 e	1.6 a	1.7 ab	無
黄	10	68 bc	61 de	40 cd	2.3 a	3.8 cd	無
	50	107 d	77 fg	57 e	1.7 a	1.6 ab	無
	100	112 d	82 g	59 e	1.3 a	1.5 ab	無
赤	10	82 c	66 ef	45 d	1.9 a	3.0 abcd	無
	50	110 d	79 g	56 e	1.6 a	1.3 a	無
	100	115 d	82 g	59 e	1.6 a	1.7 ab	無

[z] LED点灯時のキク茎頂付近における放射照度を示す

[y] 表中の同一カラム内の同一英小文字間にはTukeyのHSD検定により5%水準で有意な差がないことを示す（n=3）

葉数は，いずれも 1.3～2.3 枚となり，処理区間に有意な差が見られなかった．花首長は，黄緑色光照射の 100 mW･m^{-2} 区で 1.7 cm, 黄色および赤色光照射の 50 および 100 mW･m^{-2} 区では 1.3～1.7 cm となり，無処理区の 3.9 cm と比較して，有意に小さかったが，他の処理区と無処理区との間には有意な差は見られなかった．花弁の展開異常は，いずれの区においても見られなかった．

3 考 察

石倉ら（2009）は，白熱電球を用いた研究において，十分な放射照度を確保しつつ，秋ギク‘神馬’に対して 22:00～2:00 の暗期中断を行った場合，暗期中断終了日からの発蕾所要日数が 20 日前後となることを確認している．黄緑，黄および赤色 LED を用いた放射照度 50 および 100 mW･m^{-2} において，白熱電球で十分な放射照度を確保しつつ暗期中断を行った場合とほぼ同様に，発蕾所要日数が 18～25 日となった．特に，同一の放射照度で比較した場合，防蛾，あるいは開花抑制の観点から重要と考えられる黄緑，黄および赤色光照射の発蕾所要日数には，放射照度を最も低く設定した 10 mW･m^{-2} において有意な差が見られたものの，50 および 100 mW･m^{-2} では有意な差が見られなかった．また，切り花長，切り花重および切り花節数についても有意な差が見られなかった．このことは，これら 3 種類の LED が放射する光は，秋ギク‘神馬’に対して，少なくとも 50～100 mW･m^{-2} の放射照度域において，ほぼ同等の発蕾抑制効果を有しており，切り花形質に及ぼす影響についても差はないことを示している．従って，576，あるいは 597 nm にピーク発光波長を有する黄緑色および黄色光は，優れた開花抑制作用を有するとされる赤色光（Cathey・Borthwick，1957；1964）と同様に，‘神馬’の開花時期を計画的に遅らせるために適した光であると考えられた．しかしながら，防蛾用照明として，黄緑色および黄色光をキク栽培に適用する場合は，与える放射照度を低く抑えるなど，これらの波長の光自体が有する優れた開花抑制作用を抑えるために，何らかの工夫が必要であることが示唆された．

第 2 項 黄色蛍光灯と黄色蛍光 LED との比較

前項では，単色光に近い光を放射でき，なおかつ，異なる相対分光放射照度を有する 5 種類の LED を用いて，狭い波長域の光の波長とその放射照度が秋ギク‘神馬’の発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響を明らかにした．しかし，黄色光を放射する光源のうち，防蛾灯として利用可能な市販光源には，黄色蛍光灯のように単色光としての黄色光以外にも広い範囲の波長の光を放射する光源が多い．そこで，本項では，実際のキク栽培への適用を想定し，黄色光を放射する主要な市販光源, 加えて, 発光効率に優れる黄色蛍光 LED（専用開発品, シャープ社製, 以下 LY-LED と略記する）を用いて終夜照明を行い，秋ギクの発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響を検討した．

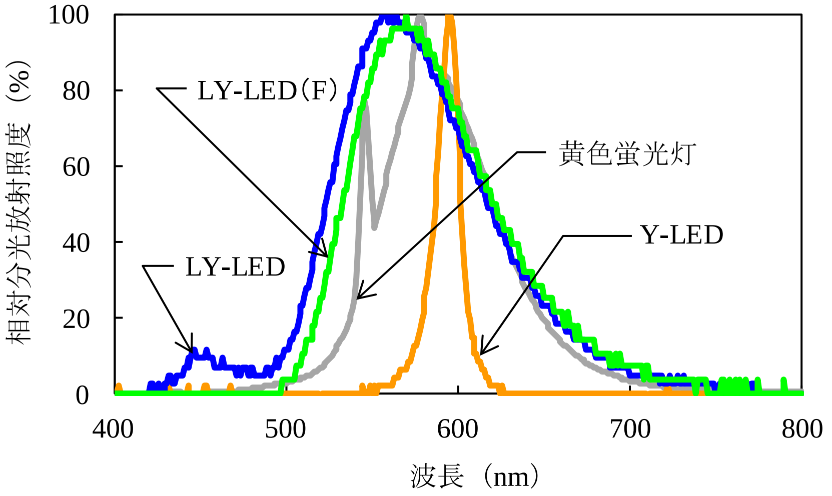
1　材料および方法

黄色蛍光灯による終夜照明が秋ギクの開花に及ぼす影響

秋ギク‘秀芳の力’を 1998 年 7 月 20 日に挿し芽し，8 月 4 日に株間 6 cm × 条間 48 cm の 2 条で地床へ定植，8 月 18 日に摘心して 2 本仕立てとし，日最低気温が 18℃を下回らないように管理したビニルハウス内で栽培した．施肥は，前項と同じ有機質複合肥料を 14.3 kg／100 m^{-2} を全層基肥として施用した．供試光源の相対分光放射照度を第 1-6 図に示した．供試光源には，580 nm 付近にピーク発光波長を有する黄色蛍光灯（FL20S･Y-F，パナソニック社製）を用い，畝端の高さ 1.8 m の位置に畝の長辺方向と直角で，なおかつ畝面と水平になるように 1 灯を固定した．供試光源点灯時の光合成有効光量子束密度（Photosynthetic Photon Flux Density，以下 PPFD と略記する）の設定位置は，定植前の畝面とした．供試光源からの距離によって，畝の長辺方向に PPFD の差を設け，供試光源点灯時の畝面における PPFD を 0.01～0.36 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ とした．PPFD の測定には，光量子計（センサ LI-190SA および本体 LI-189，LI-COR 社製）を用い，所定の PPFD を設定した．供試光源による照明は，摘心日の 8 月 18 日から 11 月 26 日までの 100 日間，毎日 17:00～7:00 に実施し，第 1 節第 1 項に準じて開花日を調査して，摘心日から開花日までの日数を到花日数とした．なお，定植日から摘心日までは，白熱電球による深夜 4 時間（22:00～2:00）の暗期中断を行った．

異なる相対分光放射照度を有する黄色 LED を用いた終夜照明が秋ギクの開花に及ぼす影響

秋ギク‘神馬’を 2008 年 9 月 5 日に挿し芽し，9 月 23 日に容量 6.2 liter（D 15 cm × W 32 cm × H 13 cm）のプランターへ 3 株ずつ定植し，日最低気温が 15℃を下回らないように管理したプラスチックハウス内で無摘心栽培した．培地および施肥は第 1 節第 1 項に準じて行った．供試光源には，ピーク発光波長を 597 nm とする AlGaInP 系の黄色 LED（LED 形式 GM5ZV01200A，シャープ社製，以下 Y-LED と略記する），450 nm 付近 ＋ 570 nm 付近とする LY-LED，LY-LED に短波長カットフィルタを装着した状態でピーク発光波長が 560 nm 付近となる LED（以下 LY-LED（F）と略記する）のチップをそれぞれ 24 個ずつ実装した 3 種類の LED モジュールと，参考として黄色蛍光灯（FL20S･Y-F，パナソニック社製）を用いた（第 1-6 図）．LY-LED には，Ba，O，Sr，Si および Eu（Europium）で構成される蛍光体を利用した一般照明用の白色 LED と同じ発光原理が用いられており，従来の AlGaInP 系の黄色 LED と比較して発光効率が優れ，なおかつ防蛾用の黄色蛍光灯に類似した相対分光放射照度を有する．各 LED モジュールは，45 cm × 45 cm のパネル中央に発光面が下向きになるように固定し，黄色蛍光灯は，プランターの長辺方向および培地表面と平行になるように固定して，キク供試個体上に設置した．なお，黄色蛍光灯は，市販のパンチングアルミ板（HA594P，Hikari ユニホビー社製）で被覆することで減光し用いた．キクの茎頂付近における放射照度は，便宜的に 5，9 および 19 $mW \cdot m^{-2}$ の 3 水準とした．また，第 1 節第 1



第 1-6 図　実験に供試した黄色蛍光灯，AlGaInP 系の Y-LED，LY-LED および短波長をカットした LY-LED（F）の相対分光放射特性

項の方法に準じ，所定の放射照度を確保し，照射光の干渉を防止した．対照として定植日以降を自然日長下で管理する無処理区を設定した．区制は 1 区 3 プランターで 3 反復とした．実験期間中は，無処理区を除き，定植日から 2008 年 12 月 2 日までの 70 日間，毎日 16:30～7:30 に終夜照明し，第 1 節第 1 項に準じ開花日を調査して，定植日から開花日までの日数を到花日数とした．

2　結　果

黄色蛍光灯による終夜照明が秋ギクの開花に及ぼす影響

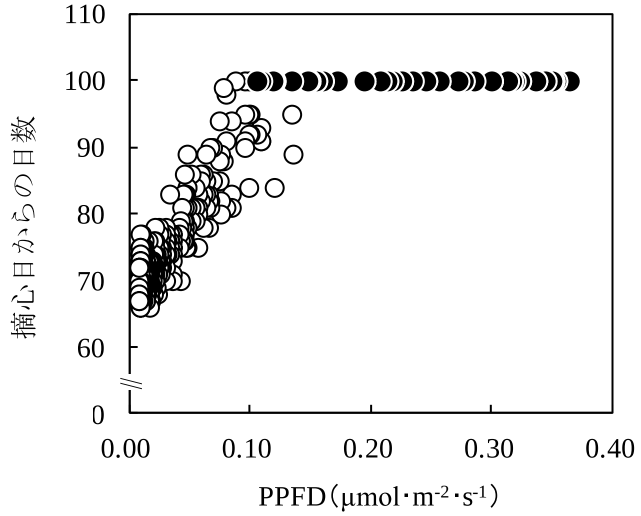
第 1-7 図に黄色蛍光灯を用いた終夜照明下の畝面における PPFD と‘秀芳の力’の開花との関係を，第 1-8 図，第 1-9 図および第 1-10 図に終夜照明下の畝面 PPFD と，到花日数，切り花長および切り花節数の関係をそれぞれ示した．PPFD が 0.01～0.10 μmol･m^{-2}･s^{-1} の範囲ですべての枝が開花し，0.11～0.14 μmol･m^{-2}･s^{-1} では開花枝と不開花枝が混在し，0.15～0.36 μmol･m^{-2}･s^{-1} ではすべて不開花枝となった．放射照度と，到花日数，切り花長および切り花節数との関係を定量することを意図して回帰直線を推定した．到花日数 Y_1（日），切り花長 Y_2（cm）および切り花節数 Y_3 と茎頂付近の放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，それぞれ第 1-8 図，第 1-9 図および第 1-10 図に示した一次回帰式で近似できた．PPFD が 0.01～0.10 μmol･m^{-2}･s^{-1} の範囲において，PPFD が高いほど到花日数，切り花長および切り花節数が増加する傾向が見られた．具体的には，0.01 μmol･m^{-2}･s^{-1}（2.6 mW･m^{-2} 相当）当たり到花日数が 2.6 日，切り花長が 3.9 cm，切り花節数が 1.5 節，それぞれ増加した．

異なる相対分光放射照度を有する黄色 LED を用いた終夜照明が秋ギクの開花に及ぼす影響

異なる相対分光放射照度を有する黄色 LED を用いた終夜照明下の放射照度と秋ギク‘神馬’の到花日数との関係を第 1-11 図に，定植 48 日後の生育状況を第 1-12 図に示した．定植日からの到花日数は，無処理区の 50 日と比較して，黄色蛍光灯および Y-LED の 9 および 19 mW･m^{-2} 区が 56～66 日，LY-LED および LY-LED（F）の 19 mW･m^{-2} 区が 61～64 日となり有意に大きかった．同一の光源内では，5 および 9 mW･m^{-2} 間に有意な差はなかったが，放射照度が高いほど到花日数は大きくなる傾向が見られた．一方，同一の放射照度で比較すると，光源の種類にかかわらず，到花日数に有意な差は見られなかった．

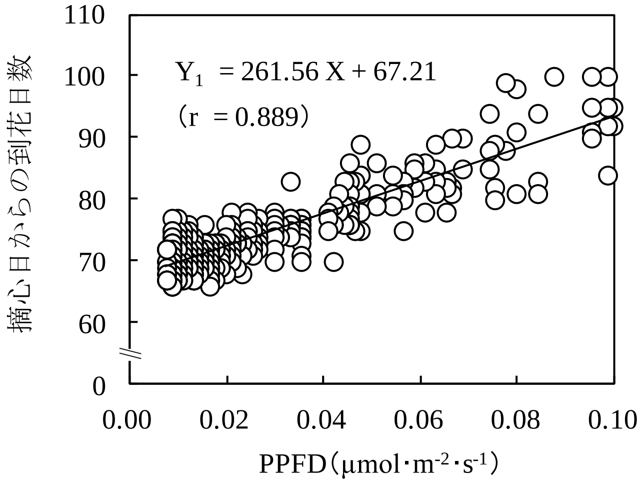
3　考　察

黄色蛍光灯による終夜照明を摘心日から継続した場合，畝面での PPFD の高低差によって，秋ギク‘秀芳の力’が開花する範囲としない範囲が存在し，また，開花する枝としない枝が混在する範囲が存在することが明らかとなった．‘秀芳の力’では，0.11～0.14 μmol･m^{-2}･s^{-1}（27～35 mW･m^{-2} 相当）を境として，PPFD が小さいと開花し，大きいと開花しなかった．開花した範囲では，

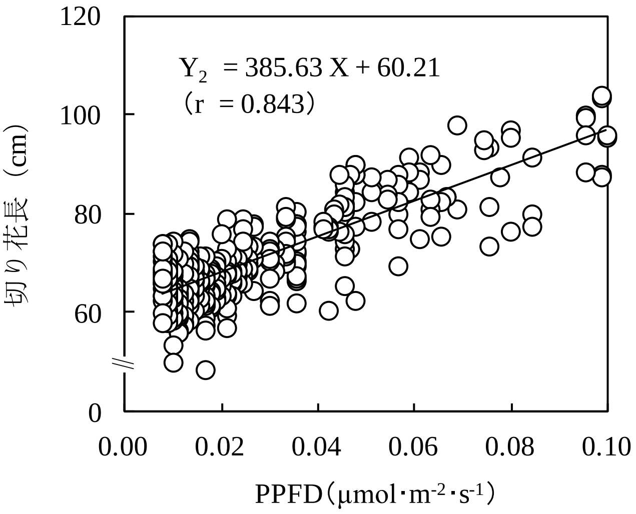


第 1-7 図　黄色蛍光灯を用いた終夜照明下の畝面における PPFD が秋ギク‘秀芳の力’の開花に及ぼす影響

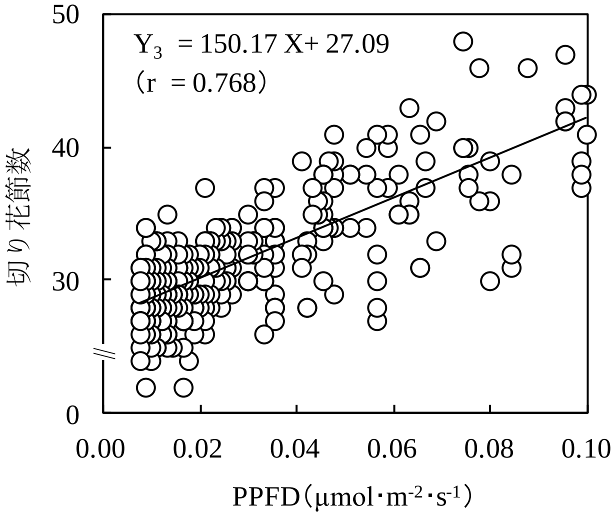
○ は摘心日から 100 日までに開花した枝の到花日数を示す
● は摘心日から 100 日時点で不開花であった枝を示す



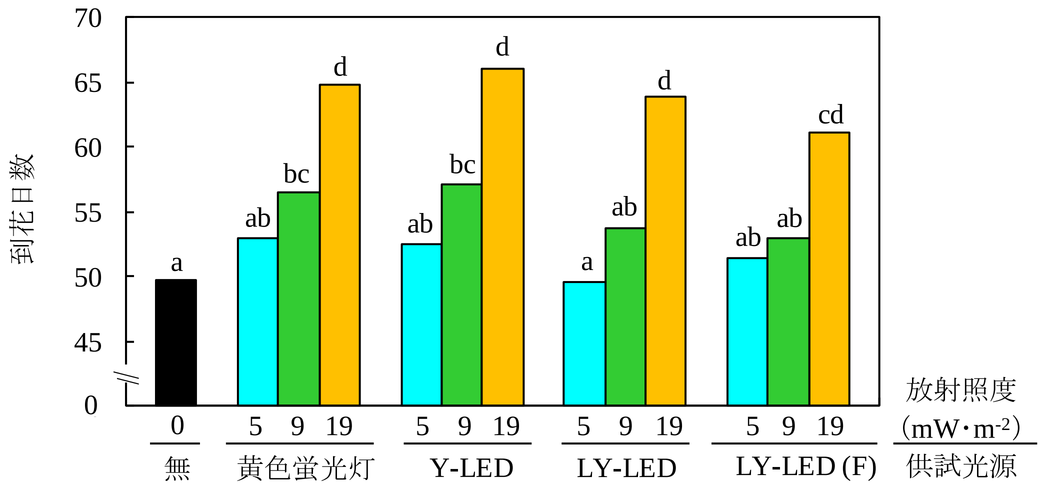
第 1-8 図　黄色蛍光灯を用いた終夜照明下の畝面 PPFD と秋ギク‘秀芳の力’の到花日数の関係



第 1-9 図　黄色蛍光灯を用いた終夜照明下の畝面 PPFD と秋ギク‘秀芳の力’の切り花長の関係



第 1-10 図　黄色蛍光灯を用いた終夜照明下の畝面 PPFD と秋ギク‘秀芳の力’の切り花節数の関係



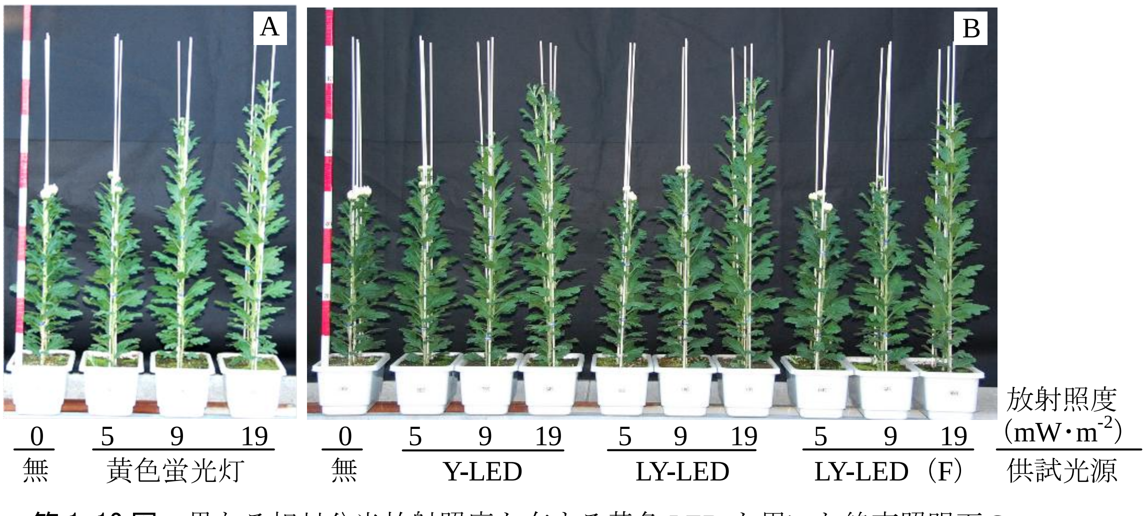
第 1-11 図　異なる相対分光放射照度を有する黄色 LED を用いた終夜照明下の放射照度が秋ギク‘神馬’の到花日数に及ぼす影響

到花日数は 2008 年 9 月 23 日の定植日から開花日までの日数を示す

図中の異なる英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（$n = 3$）

放射照度は供試光源点灯時のキク茎頂付近における値を示す

図中の左下の「$\frac{0}{無}$」は定植後に自然日長下で管理した無処理区を示す



第 1-12 図　異なる相対分光放射照度を有する黄色 LED を用いた終夜照明下の放射照度が秋ギク‘神馬’の生育状況に及ぼす影響（定植 48 日後）

A 無処理および黄色蛍光灯，B 無処理および 3 種類の黄色 LED

摘心日からの到花日数，切り花長および切り花節数はPPFDに比例して増加した．しかしながら，白熱電球を用いた電照に対する開花反応は品種により異なる（岡田，1963）とされているので，黄色光を用いる防蛾用照明においても，品種適応性について検討する必要がある．

黄色蛍光灯は，580 nm付近にピーク発光波長を有しているが，600 nm以上の波長も放射している（第1-6図）．第1項では，597 nm付近をピーク発光波長とする単色光に近い黄色光によっても，秋ギク‘神馬’の開花が強く抑制されることが明らかとなった．また，低圧ナトリウムランプ（NX35，パナソニック社製）を用いた589 nm付近の単波長の照射によっても，0.06～0.08 μmol･m^{-2}･s^{-1}（15～20 mW･m^{-2}相当）を境として，PPFDが大きいと秋ギク‘セイローザ’の開花が強く抑制される（石倉ら，2000）ことを確認している．このことから，黄色蛍光灯の照明による開花抑制は，黄色蛍光灯の放射する光の波長のうち，開花抑制作用が強いとされる600～700 nmのR光（洞口ら，1997）に加えて，580 nm付近の波長も深く関与していると考えられた．従って，市販の黄色蛍光灯に何らかの改良を施すことでR光を除去できても，秋ギクの開花への影響を軽減することは難しいと考えられる．

本項において，実際のキク栽培への適用を想定し，黄色光を放射する主要な市販光源である黄色蛍光灯，AlGaInP系のY-LED，発光効率に優れるLY-LEDおよびLY-LED（F）を用いて終夜照明を行ったところ，キクの茎頂付近において設定した放射照度5，9および19 mW･m^{-2}において，同一の放射照度で比較した場合，光源にかかわらず，秋ギク‘神馬’の到花日数に有意な影響を及ぼさないことが明らかとなった．第1節第2項で供試したLY-LEDは，既存のAlGaInP系の黄色LEDと比較して，半値幅が広く，防蛾と開花抑制で重要と考えられる黄緑，黄および赤色光のすべてを放射でき，しかも発光効率においても優れている．さらに，LY-LEDには，Ba，O，Sr，SiおよびEu（Europium）で構成される蛍光体を利用した発光原理が用いられていることなど，すでに市販されている一般照明用の白色LEDと共通した部分が多い．このため，光源の実用化にあたっては，先行する一般照明用の白色LEDで採用されている技術との共通化や量産効果により，「適正な価格の商品」を利用者に提供できる可能性は高い．LY-LEDは，蛍光体の励起光として，450 nm付近にピーク発光波長を有する青色光が使われており，LY-LEDの放射光全体からすると，わずかな割合であるが青色光を放射している（第1-6図）．第1節第1項において，463 nm付近にピーク発光波長を有する青色光は，他の光の波長と比較して，秋ギクの開花に大きな影響を及ぼさないことを確認している．しかしながら，450 nm付近の波長は，昆虫が好んで集まるとされる300～500 nmの波長域（河本，1992）内にあるので，昆虫の行動学の観点からは注意が必要と考えられる．このため，確実性を追求するならば，短波長カットフィルタにより蛍光体の励起光である青色光を除去することが望ましい．ただし，短波長カットフィルタは青色光以外の波長の光も減衰させてしまうこと，さらに高コストとなるなどの課題もあり，実用化にあたっては，これらを総合的に判断し，適切に対応する必要があると考えている．

以上のことから，秋ギク栽培において，防蛾を目的として黄色光を連続照明として利用する場

合は，開花への影響を考慮すると，照明下の PPFD，あるいは放射照度に大きく制約を受けることが判明した．このため，実際の利用にあたっては，照明下における PPFD，あるいは放射照度を，開花可能で商品価値を損ねない範囲に留め，生育状況に応じて，均一に調節する必要があると考えられた．

現在，市販されている黄色蛍光灯は，その構造上の特性のために，電圧の制御などによって放射する光の強さを自在に調整することは難しい．また，電照栽培で一般的に用いられている白熱電球などと比較して，光源自体が大きいので，圃場では固定して使用せざるを得ない．従って，黄色蛍光灯を用いる場合は，キクの成長に応じて，PPFD，あるいは放射照度を精密に調整することは実際上，困難と考えられる．

第 3 項　白熱電球と同等の開花抑制作用が得られる放射照度

2009 年 5 月までは，1 球 10,000 円の LED 電球に代表されるように，「LED 製品は高価」という印象が強かった．しかし，2009 年 6 月に 1 球 4,000 円代の LED 電球が市場投入されるなど，一般照明用の白色 LED の性能（明るさ）向上や量産効果により，低価格化が進んでおり，現在は，1 球 1,000 円を下回る LED 電球も市販されるようになった．この傾向は今後もしばらくは続くものと考えられる．前項で供試した LY-LED には，蛍光体を利用した一般照明用の白色 LED と同じ発光原理が用いられており，一般照明用の白色 LED の発展に伴い，LY-LED についても，更なる性能向上と低価格化が期待できる．

第 1 節第 1 項では，黄緑色および黄色光は，優れた開花抑制作用を有するとされる赤色光（Cathey・Borthwick, 1957；1964）と同様に，‘神馬’の開花時期を計画的に遅らせるために適した光であることを明らかにした．また，第 1 節第 2 項では，秋ギクの開花は，黄色光を連続照明として利用する場合，照明下の PPFD，あるいは放射照度に大きく制約を受けることを明らかにした．

白熱電球を光源とする電照に対し，キクが示す開花反応は品種によって異なる（岡田，1963）が，「白熱電球で 50 lx（360 mW･m^{-2} 相当）」は，キクの電照抑制栽培のための 1 つの基準（木村，1974；米村，1993）とされている．石倉ら（2009）も，白熱電球を用いた深夜 4 時間の暗期中断を行った場合，十分な発蕾抑制効果を得るために必要となる畝面での放射照度の下限値は，秋ギク‘神馬’では，182～189 mW･m^{-2} であることを確認している．一方，防蛾に有効な最低照度は 1～2 lx（1.2～3.2 mW･m^{-2} 相当）以上とされおり（内田ら，1978；藪，1999），防蛾に有効とされる下限値は，放射照度に換算すると電照抑制栽培のための基準の 113～300 分の 1 と低い．

一般に，LED は明るさ（放射照度）の調節が容易な光源とされている（後藤，2006）．LY-LED は，将来的には，適切な放射照度に調光しつつ用いることで，キクの防蛾と計画的な開花抑制の 2 つの目的を，単一の光源として同時に，あるいは使い分けて達成できる可能性は高いと考えている．

そこで，本項では，防蛾用のみならず開花抑制用光源としての利用も考えられる LY-LED を供試し，秋ギクを電照抑制栽培する場合に，白熱電球と同等の開花抑制作用を得るために必要となる放射照度を検討した．

1　材料および方法

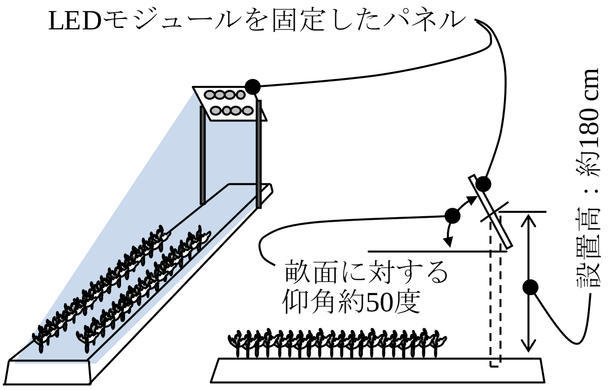
LY-LED を用いた夜間照明が秋ギク‘神馬’の発蕾および切り花形質に及ぼす影響

秋ギク‘神馬’を 2010 年 9 月 12 日に挿し芽し，10 月 2 日に株間 7.5 cm × 条間 45 cm の 2 条で地床へ定植して，日最低気温が 15℃を下回らないように管理したプラスチックハウス内で無摘心栽培した．本圃では，第 1 節第 1 項と同じ有機質複合肥料 18.6 kg／100 m^2 と，炭酸カルシウム 10 kg／100 m^2 を全量基肥として施与した．供試光源には，第 1 節第 2 項と同じ LY-LED を実装したモジュールを用いた（第 1-6 図）．なお，本項では，第 1 節第 2 項の結果に基づいて，短波長カットフィルタを装着しない状態で用いた．処理区には，所定の放射照度を確保した連続光による照明を行い，照明時間帯を 22:00～2:00 とする暗期中断区と，16:30～7:30 とする終夜照明区の 2 区を設けた．供試光源は，第 1-13 図に示すように，畝端の高さ約 180 cm の位置に設置し，モジュールを固定したパネルの畝面に対する仰角を約 50° とした．放射照度の設定位置は，定植前の畝面とした．供試光源からの距離によって，畝の長辺方向に放射照度の差を設け，照明時における畝面での水平面放射照度は 3～260 mW･m^{-2} を確保しつつ, 定植日から 11 月 12 日までの 41 日間毎日照明し，その後は自然日長下で管理した．第 1 節第 1 項に準じ，発蕾日を調査し，長日処理終了日から発蕾日までの日数を発蕾所要日数とした．

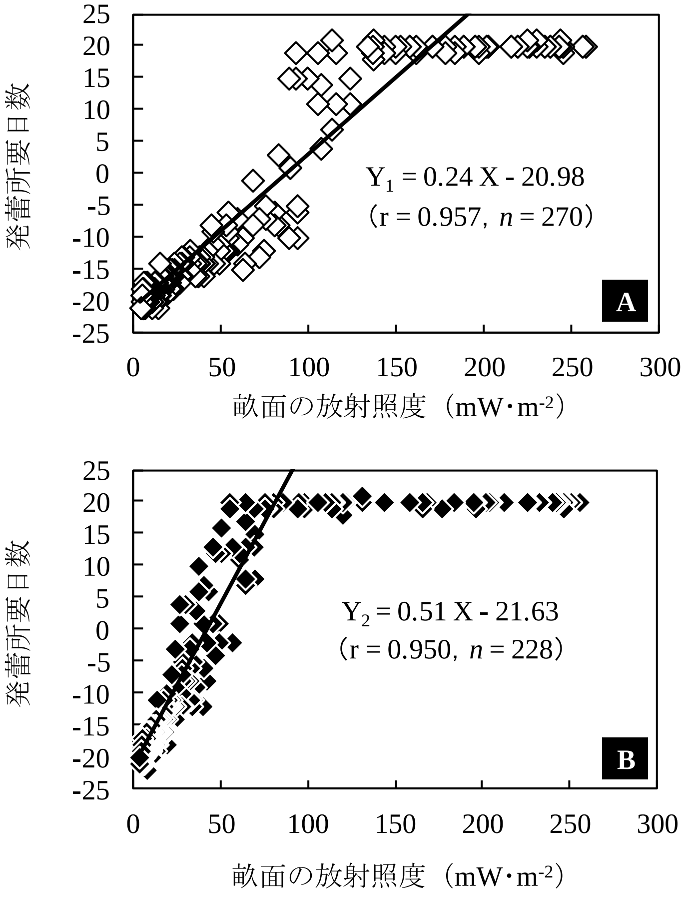
2　結　果

LY-LED を用いた夜間照明が秋ギク‘神馬’の発蕾および切り花形質に及ぼす影響

第 1-14 図に，日長処理ごとの畝面における放射照度と秋ギク‘神馬’の発蕾所要日数との関係を示した．夜間照明終了日からの発蕾所要日数は，両処理区ともに特定の放射照度域では放射照度が大きいほど増加し，それを越えると，放射照度に関わらず，一定となる同様なパターンが見られた．放射照度と発蕾所要日数との関係における日長処理の影響を定量することを意図して回帰式を推定した．放射照度に比例して発蕾所要日数の増加が見られた放射照度域では，暗期中断区における発蕾所要日数 Y_1（日）と畝面におけるの放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，第 1-14 図 A に示した一次回帰式で近似できた．この一次回帰式では X が 170 mW･m^{-2} のとき，Y_1 は 20 日となり，170～260 mW･m^{-2} の範囲で，ほぼ一定の 20 日となった．同様に，終夜照明区における発蕾所要日数 Y_2（日）と茎頂付近の放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，第 1-14 図 B に示した一次回帰式で近似できた．この一次回帰式では X が 81 mW･m^{-2} のとき，Y_2 は 20 日となり，81～260 mW･



第 1-13 図　処理の模式図



第 1-14 図　LY-LED を用いた夜間照明下の放射照度が秋ギク‘神馬’の発蕾所要日数に及ぼす影響

A 暗期中断区，B 終夜照明区

発蕾所要日数は夜間照明終了日の 11 月 12 日から発蕾日までの日数を示し，
11 月 12 日より前に発蕾した場合はマイナス値で示す

m^{-2}の範囲で，ほぼ一定の 20 日となった．なお，これら 2 つの一次回帰式は，それぞれの相関係数 r が最大となることを前提に推定した．

第 1-2 表に，LY-LED を用いた照明時間が秋ギク‘神馬’の切り花形質に及ぼす影響について示した．切り花長，切り花節数および花首長には，処理区間に有意な差が見られたものの，大きな影響は見られなかった．やなぎ葉数は，処理区間に有意な差が見られず，暗期中断区で 1.3 枚，終夜照明区では 1.4 枚となった．また，花弁の展開異常は，いずれの処理区においても見られなかった．

3 考 察

黄色光による防蛾効果は終夜照明下で最大（八瀬，2004）となる．しかし，第 1 節第 1 項は 4 時間の暗期中断の結果であるので，第 1 節第 3 項では LY-LED 光による暗期中断と終夜照明による影響を比較調査した．秋ギク‘神馬’を供試した場合，やなぎ葉数を除く切り花形質に有意な差が見られたものの，大きな影響がないことが明らかとなった．白熱電球と同等の開花抑制作用（発蕾抑制作用）を得るためには，LY-LED を用いた暗期中断では，畝面における放射照度を概ね 170 mW･m^{-2}以上に大きくする必要があったが，終夜照明した場合は，概ね 80 mW･m^{-2}以上を確保すれば十分であった．

大規模な電照栽培において，電気設備容量がしばしば問題になる．電照における電気設備容量とは，電照を行っている圃場において，同時に使用できる電流量（アンペア数）を指す．電気設備容量が大きいと，それに対応する送電設備が必要となる．また，電力会社により，電気設備容量ごとに電気基本料金が定められており，電気設備容量が大きいほど，電気基本料金は高くなる．終夜照明では，暗期中断の 3 倍以上の照明時間が必要であるが，開花抑制に必要となる放射照度の下限値は，本実験の結果から暗期中断のほぼ半分であった．このため，LY-LED による終夜照明を採用することで必要となる時間当たりの電気設備容量も暗期中断のほぼ半分でよく，送電設備の軽装化と電気基本料金の低減に大きく貢献できるものと期待している．

一方，典型的な短日植物である切り花ギクの生産においても適用できるヤガ類の光防除技術の開発にあたっては，防除効果の発現と，開花遅延の回避という二律背反する課題を同時に解決する必要がある．石倉ら（1998）は，キクに対する開花抑制作用は，カラード蛍光灯を用いた場合，黄色光と比較して，緑色光で小さいことを指摘した．また，山中ら（2006）は，ピーク発光波長が 520～540 nm の緑色蛍光灯を用いて，9 月咲きギク栽培における防蛾効果と開花への影響を検討し，照度が 0.2～6.4 lx の範囲でオオタバコガによる被害が見られなかったこと，加えて輪ギク‘松本城’の花蕾径と照度の間に負の相関関係（$r = 0.777$，5%水準で有意）があり，6.4 lx（約 12 mW･m^{-2}）では開花がやや遅延したことを報告している．緑，黄緑および黄色光のうち，防蛾効果が最も優れるのはどの光であるかを示した報告は見あたらないが，照射光自体が有する開花抑制作用が小さいという点においては，黄緑および黄色光と比較して，緑色光が，より適していると

第 1-2 表 LY-LED を用いた夜間照明が秋ギク‘神馬’の切り花形質に及ぼす影響

処理区	切り花長（cm）	切り花節数	やなぎ葉数	花首長（cm）	花弁の展開異常
暗期中断	124	62	1.4	2.3	無
終夜照明	122	60	1.4	2.0	無
有意性	** [z]	**	NS	*	-

[z] T検定により** は1%，* は5%水準で有意な差があり，NSは有意な差がないことを示す（n = 40）

畝面での放射照度：170～260 mW･m^{-2}

考えられる．しかしながら，緑色光の有する開花抑制作用が小さいことは，「防蛾と開花抑制の 2 つを単一の光源で実現する」という観点からは適切とはいえない．

第 2 節　人工光に対するオオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の視覚特性

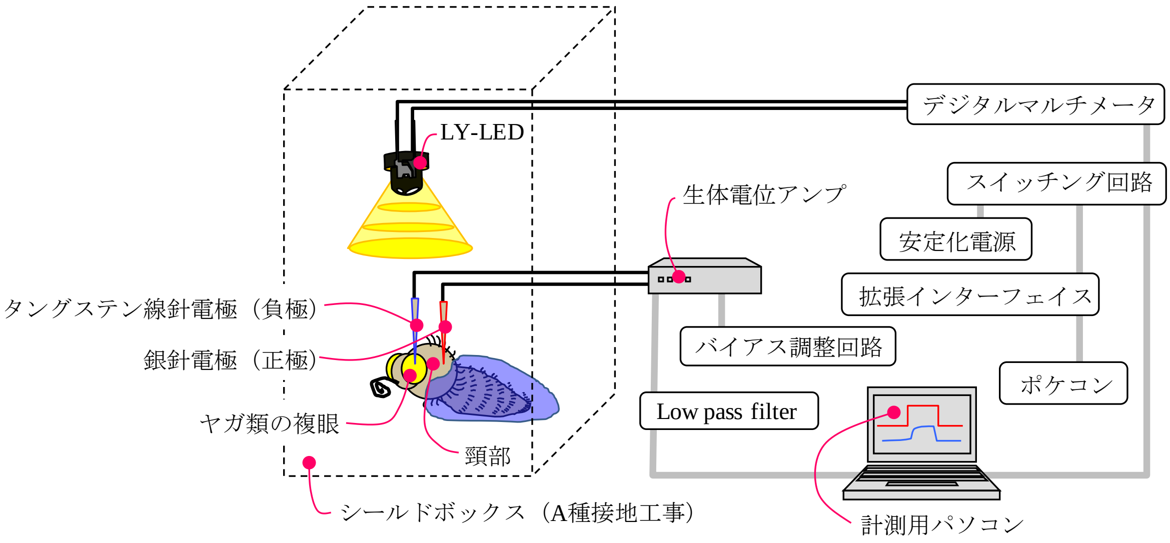
連続光である黄色蛍光灯の照明は，照明に対する「慣れ現象」をヤガ類に引き起こし，防除効果が低下する恐れがあるため，平間ら（2002 ; 2007）は，照射光を点滅光として常時視認させる防蛾照明技術を発案した．点滅光として常時視認させるためには，ちらつき光の臨界融合頻度（江口，1995）を超えない周波数で照明する必要がある．平間ら（2002）は，デューティー比が 50% に相当する明期と暗期との比率が 1 : 1 の場合，オオタバコガとハスモンヨトウが点滅光として視認できるのは，パルス光の時間構造である明期と暗期がともに約 10 ms（10^{-2} 秒）が限界であることを報告した．これを受けて，審良ら（2009）は，10 ms および 20 ms の 2 水準の明期を設定し，ERG 信号計測システムにより，オオタバコガ成虫の視覚に対する黄色パルス光の刺激力を解析した．その結果，防蛾に有効な照度の下限値（那波・向阪，1995 ; 内田ら，1978 ; 八瀬ら，1997）と報告されている 1 lx（約 1.2 mW･m^{-2}）の場合，明期 10 ms と比較して，明期 20 ms において刺激力が大きい傾向にあったと指摘している．また，尹ら（2010 ; 2011 ; 2012）は，放射照度が 20 mW･m^{-2} の場合，明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光によって，オオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の飛翔行動を効果的に抑制できたと指摘・報告している．しかしながら，これらの知見においては，20 mW･m^{-2} より高い放射照度域での反応について，十分に検討されていない．

そこで，本節では，当該 2 種のヤガ類成虫の複眼へ，前述の明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を，20 mW･m^{-2} より高い放射照度で照射した場合の刺激力について，ERG 信号計測システムを用いて解析した．

1　材料および方法

ERG 信号計測システム

第 1-15 図に，ERG 信号計測システムの模式図を示す．ヤガ類成虫の複眼に光を照射すると，複眼内部で微弱な電圧である ERG が発生する．この電圧を増幅して解析することによって，ヤガ類成虫が照射光を強く認識しているか否かを判定することができる．これが ERG 計測システムの原理である．ヤガ類成虫の頸部に塩化銀膜を施した直径 100 μm の銀針電極（正極）を挿入し，直径 10 μm のタングステン線針電極（負極）を複眼の上部に挿入した．複眼に LED のパルス光を照射し，この際に誘発する微弱な ERG 信号を生体電位アンプ（BE-AMP-02，イーグルテクノロジー社製，CMRR:80 dB 以上，S/N:60 dB 以上，DC～100 kHz(-3 dB)）で 1000 倍に増幅した．Low Pass Filter



第 1-15 図　ERG 信号計測システムの模式図

（遮断周波数 fc:800 Hz）を用いて，800 Hz より高い周波数の帯域を減衰させることでノイズを除去後，計測用 PC のサンプリング周波数を 2 kHz，計測時間は 15 s とし，DC から fc の帯域までの ERG 信号を計測した．計測系全体をシールドボックス内に納め，さらに A 種接地工事を施して外来ノイズを除去した．

黄色パルス光を照射した場合に，ヤガ類成虫の複眼内で誘発したERGにおけるアンダーシュートのBottomとオーバーシュートのTopとの電位差をV_{BT}（Voltage of Bottom to Top）と定義した．その際，計測した順で便宜的にV_{BT}1～3とし，異なる放射照度で誘発したV_{BT}1～3の平均値を解析した．

なお，供試虫であるオオタバコガには，住化テクノサービスから購入した蛹を羽化させた成虫10頭（オス：5，メス：5）を用いた．また，ハスモンヨトウは，石川県および高知県で野外より採集した個体と，それらを3世代程度累代飼育して得られた成虫16頭（オス：10，メス：6）を用いた．

LY-LED の制御とパルス光の明期における放射照度

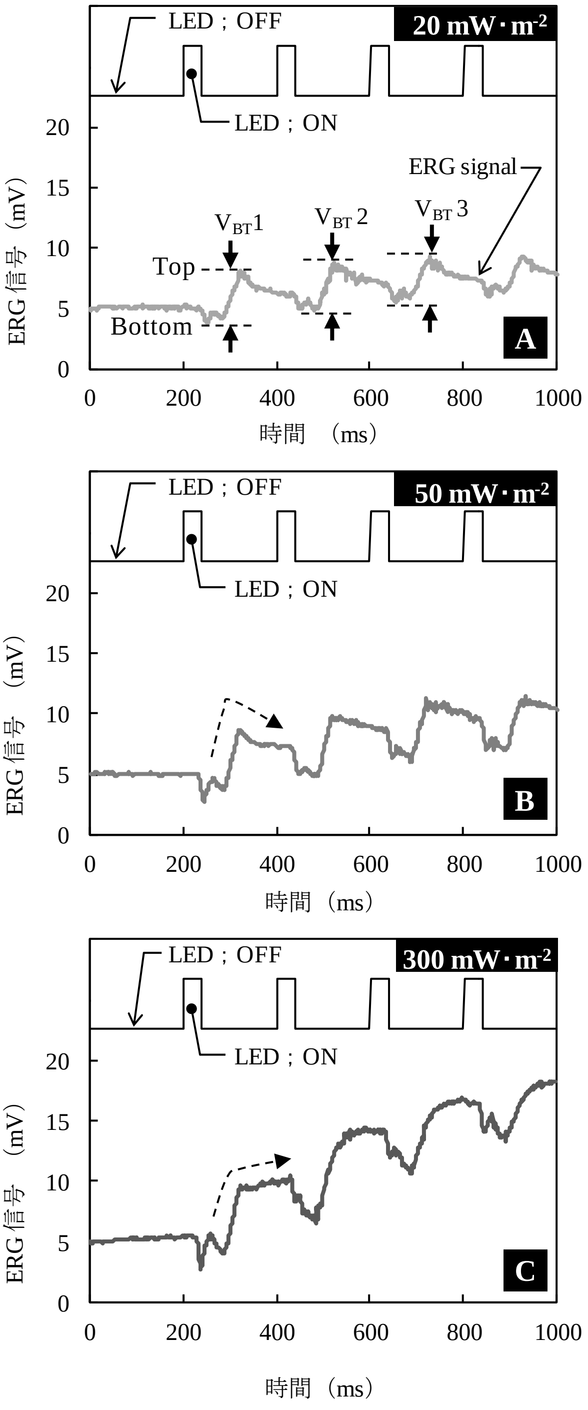
供試光源には，第 1 節第 2 項で用いた LY-LED（第 1-6 図）を用いた．複眼頭頂部から 1.5 cm の高さに LY-LED を設置し，所定の黄色パルス光を供試個体の複眼へ照射した．パルス光の時間構造である明期と暗期の設定は，ポケットコンピュータ（PC-G850 V，シャープ社製）で制御した．ただし，針電極の挿入後，ERG 信号を安定させるため約 20 分間の暗状態を保ち，その後，設定した各時間構造で，1 つの時間構造当たり約 10 s 照射し，ERG 信号を計測した．なお，1 つの時間構造から次の時間構造への移行にあたっては，複眼の ERG 信号を安定させるため，5 分間の連続した暗期を設けて暗適応させた．

黄色パルス光の時間構造は，明期 20 ms／暗期 80 ms に設定した．放射照度は，1，10，20，50，100，300，500 および 1000 mW･m^{-2} の 8 水準とした．

2　結　果

黄色パルス光の放射照度と網膜電位（ERG）信号波形の経時的変化

第 1-16 図にオオタバコガ成虫の複眼に誘発した代表的な ERG 信号波形を示した．放射照度が 20 mW･m^{-2}（第 1-16 図 A），50 mW･m^{-2}（第 1-16 図 B）および 300 mW･m^{-2}（第 1-16 図 C）では，いずれも光照射直後から約 20 ms 遅れてアンダーシュートが観測された．光点滅に追従した ERG 信号の振幅の変化は，設定したすべての放射照度で確認できた．しかし，点線矢印で示したとおり，20 mW･m^{-2}（第 1-16 図 A）および 50 mW･m^{-2}（第 1-16 図 B）の ERG 信号波形は，ピーク後に緩やかに減衰したのに対し，300 mW･m^{-2}（第 1-16 図 C）では，前述の遅延特性を示しつつアンダーシュートが観測された後，2 段階にわたって緩やかに上昇する特徴が見られた．



第 1-16 図　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度がオオタバコガ（オス）の ERG 信号の経時的変化に及ぼす影響

放射照度とERGにおけるアンダーシュートとオーバーシュートの電位差

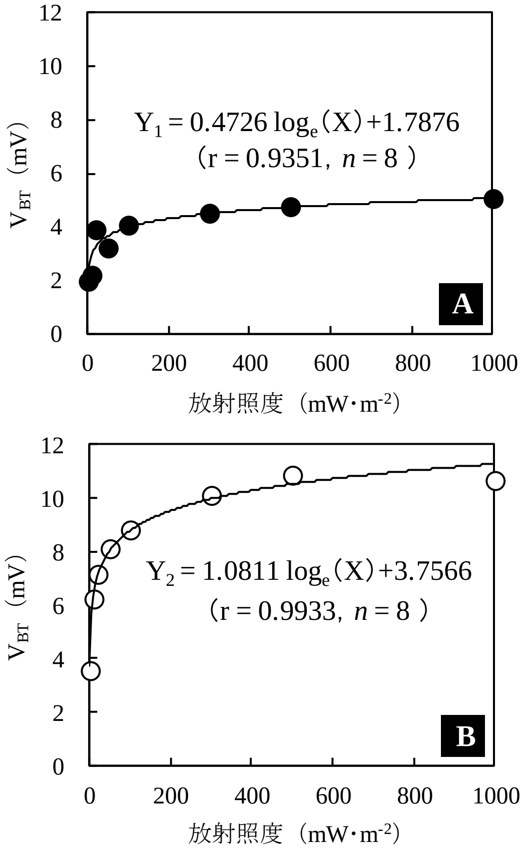
第1-17図Aに，オオタバコガ成虫の複眼に対し，明期20 ms／暗期80 msの時間構造を有する黄色パルス光を，異なる放射照度で照射した場合の V_{BT} の変化を示した．図中の縦軸は，計測した順で便宜的に V_{BT}1～3 とした場合のそれらの平均値，横軸は放射照度を示した．なお，V_{BT} の値が大きいほど，光による刺激力は大きいとみなすことができる．放射照度と V_{BT} との関係における種間差を定量することを意図して回帰式を推定した．V_{BT}：Y_1（mV）と放射照度：X（mW･m^{-2}）の関係は，第1-17図Aに示した対数回帰式で近似でき，1～1000 mW･m^{-2} の範囲で放射照度が大きいほど V_{BT} は増加した．

第1-17図Bには，第1-17図Aと同様に，異なる放射照度におけるハスモンヨトウ成虫の V_{BT} の変化を示した．V_{BT}：Y_2（mV）と放射照度：X（mW･m^{-2}）の関係は，第1-17図Bに示した対数回帰式で近似でき，1～1000 mW･m^{-2} の範囲で放射照度が大きいほど V_{BT} は増加した．

3　考　察

オオタバコガ成虫の複眼に誘発したERG信号波形は，放射照度が20 mW･m^{-2}（第1-16図A），50 mW･m^{-2}（第1-16図B）および300 mW･m^{-2}（第1-16図C）において，常時安定したERG信号の繰返し波形を示しつつ，光点滅に十分追従したERG信号の振幅の変化も観測された．このことから，石倉ら（2010）が示した明期10 ms／暗期10 msの時間構造と比較して，本報の明期20 ms／暗期80 msが，複眼への刺激力の安定性および持続性において優れると推察された．また，光点滅に追従したERG信号の振幅の変化は，設定したすべての放射照度で確認できたことから，オオタバコガは，明期20 ms／暗期80 msの時間構造を有する黄色パルス光を照射した場合，1～1000 mW･m^{-2} の放射照度域を点滅光として視認していると推察された．300 mW･m^{-2}（第1-16図C）では，点線矢印で示したとおり，前述の遅延特性を示しつつアンダーシュートが観測された後，2段階にわたって緩やかに上昇する特徴が観察されたが，この特徴は，放射照度300～1000 mW･m^{-2} でも同様に観察されたことから，オオタバコガのパルス光に対する視認性は，100 mW･m^{-2} 付近を境界として変化がはじまり，300 mW m^{-2} 以上で変化が大きくなるものと考えられた．平間ら（2002）は，オオタバコガは放射照度が大きいほど速い点滅を視認しにくいことをすでに報告している．

一方，石倉ら（2010）は，放射照度が1.2 mW･m^{-2} で明期10 ms／暗期500 msの時間構造を有する黄色パルス光の下では，ハスモンヨトウのERG信号波形は，オオタバコガと比較して，ピーク後緩やかに減衰するという種に起因する特徴が見られることを明らかにした．本実験でも，明期20 ms／暗期80 msの時間構造で放射照度が1～100 mW･m^{-2} においては同様な特徴が見られたが，ERG信号波形の光照射終了直後の減衰スピードに若干の違いはあるものの，この範囲の放射照度のパルス光に対するERG信号の追従性は，当該2種のヤガ類に共通する特徴と考えられる．このため，当該2種のパルス光による防除において，少なくとも1～100 mW･m^{-2} であれば，明期20 ms／暗期80 msの時間構造を有する黄色パルス光を，点滅光として常時安定的，かつ持続的に視認



第 1-17 図　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度がオオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の複眼内で誘発した ERG 信号におけるアンダーシュートの Bottom とオーバーシュートの Top との電位差（V_{BT}）に及ぼす影響

A オオタバコガ成虫（オス），B ハスモンヨトウ成虫（オス）

させることができると考えられた．

第 1-17 図に示したとおり，オオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫においては，1～1000 mW･m^{-2} の範囲で放射照度が大きいほど V_{BT} は増加したため，これらの範囲では放射照度が大きいほど刺激力も大きいと考えられた．しかしながら，100～1000 mW･m^{-2} の範囲における V_{BT} は，オオタバコガでは 4 mV 前後であり，大きな差は見られなかったことから，この範囲の放射照度によるオオタバコガへの刺激力には，大きな差がないと考えられた．一方，ハスモンヨトウについても，1～100 mW･m^{-2} では，それより大きい放射照度域と比較して，対数回帰式の傾きが大であり，1 mW･m^{-2} 当たりの V_{BT} の増加量が大きかった．このため，ハスモンヨトウのパルス光による防除においては，わずかな放射照度の差によって刺激力が大きく変化する 1～100 mW･m^{-2} の放射照度域について，詳細に検討する必要があると考えられた．

第 3 節　黄色パルス光とキクの開花反応特性

秋ギクの計画生産を目的とする電照抑制栽培では，その照明時間を連続して照明するのではなく，短時間ずつ断続的に照明する方法があり，サイクリック照明，あるいは間欠照明と呼ばれている（米村，1993）．一般に間欠照明では，短い周期にして，短時間の光を複数回与えるのが効果的であり，適切な周期は 1～30 分程度で，照度が十分であれば，照明時間はその 10～20%程度でよいとされている（米村，1993）．石倉・村上（2006）は，赤色 LED を用いて，一般的な間欠照明よりも，さらに短い周期である秒単位で間欠照明し，秋ギクの開花に及ぼす影響を検討した結果，明暗比率が異なることによって開花抑制効果に差があることを見いだした．このことは，相対分光放射照度が異なるものの，防蛾用の黄色光による照明においても明暗比率を調節することによって，秋ギクの開花への影響を制御できる可能性を示唆している．しかし，防蛾用の黄色パルス光と短日植物である切り花ギクの開花反応との関係を検討した報告は見られない．

そこで，本節では，防蛾用照明として実績のある黄色光を放射する LED を用い，オオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の飛翔行動抑制に有効（尹ら，2010；2011；2012）とされる明期 20 ms／暗期 80 ms を中心とする時間構造を設定し，切り花ギクへ照射することで，発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響を明らかにしようと試みた．

第 1 項　黄色パルス光のデューティー比とキクの開花反応特性

本項では，防蛾用照明として実績のある黄色光を放射する LED を用い，異なるデューティー比の黄色パルス光の照射が秋ギクの発蕾に及ぼす影響を明らかにすることで，夜間照明による影響を軽減する上で重要となるパルス化の有効性を検証した．

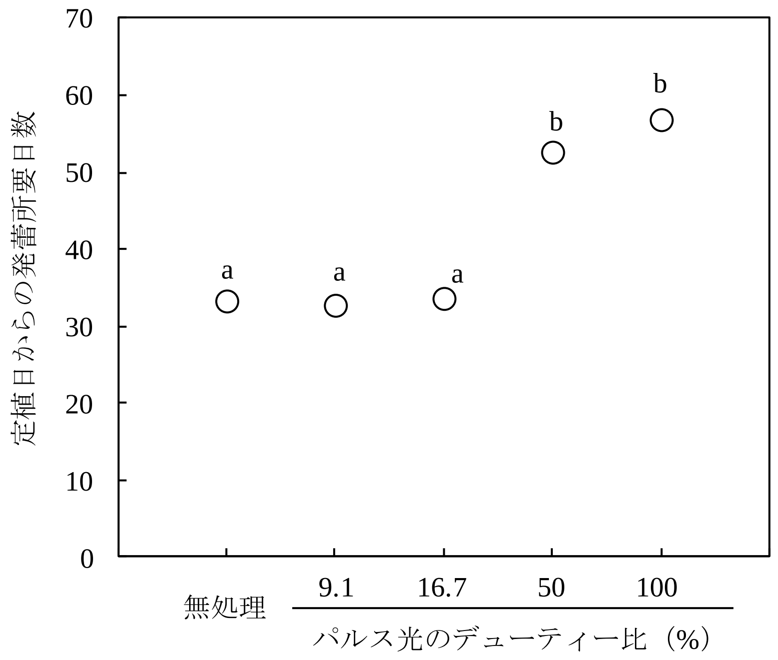
1　材料および方法

秋ギク‘神馬’を 2008 年 11 月 15 日に挿し芽し，12 月 1 日に容量 6.2 liter（D 15 cm×W 32 cm ×H 13 cm）のプランターへ 3 株ずつ定植し，日最低気温が 15℃を下回らないように管理したプラスチックハウス内で無摘心栽培した. 培地および施肥は第 1 節第 1 項に準じた. 供試光源には，第 1 節第 2 項と同じ LY-LED（第 1-6 図）のチップを 24 個実装した LED モジュールを，短波長カットフィルタを装着した状態で用いた．LED モジュールは，45 cm × 45 cm のパネル中央に発光面が下向きになるように固定し，キク供試個体上に設置した．LED モジュール点灯時のキクの茎頂付近における放射照度は 40 $mW \cdot m^{-2}$ とし，第 1 節第 1 項の方法に準じて所定の放射照度を確保し，照射光の干渉を防止した．パルス光の時間構造については，審良ら（2009）が明期 10 ms と比較してオオタバコガ成虫の複眼への刺激力が大きいと指摘している 20 ms で固定した．パルス光のデューティー比は，異なる暗期を設定することによって，便宜的に 9.1，16.7，50 および 100%の 4 水準とした．なお，デューティー比 100%に設定した照射光は，パルス光ではなく連続光となる．対照として定植日以降を自然日長下で管理する無処理区を設定した．実験期間中は，無処理区を除き, 定植日から 2009 年 3 月 4 日までの 93 日間, 毎日 16:30～7:30 に終夜照明し, 発蕾日と，定植 93 日後の開花率および立ち毛での形質を調査し，定植日から発蕾日までの日数を発蕾所要日数とした.

2　結　果

第 1-18 図に，明期 20 ms の時間構造を有する黄色パルス光を，異なるデューティー比で照射した場合の秋ギク‘神馬’の発蕾所要日数に及ぼす影響について示した．無処理区の 33.3 日と比較して, デューティー比 9.1%区の 32.8 日および 16.7%区の 33.7 日では有意な差が見られなかったものの，50%区で 19.4 日，100%区では 23.6 日大きく，有意な差が見られた.

第 1-3 表に，定植 70 日後の発蕾率，定植 93 日後の開花率および立ち毛での形質に及ぼす影響について示した．発蕾率は，すべての区で 100%であった．開花率は，無処理区，デューティー比 9.1%区，16.7%区および 50%区において 100%に達したが，連続光にあたるデューティー比 100%区においては，56%に留まった．茎長は，無処理区の 45.4 cm と比較して，9.1%区および 16.7%区では有意な差が見られなかったが，50%区で 32 cm，100%区では 53 cm 大きく，有意な差が見られた．節数は，茎長と同様に，無処理区の 30.1 節と比較して，9.1%区および 16.7%区では有意な差が見られなかったが，50%区で 11.9 節，100%区では 16.6 節多く，有意な差が見られた．花弁の展開異常は，無処理区，9.1%区および 16.7%区において発生は見られなかったが，50%区および 100%区においては発生が見られた.



第 1-18 図 明期 20 ms の時間構造を有する黄色パルス光による終夜照明時のデューティー比が秋ギク‘神馬’の定植日からの発蕾所要日数に及ぼす影響

図中の同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（$n = 3$）

第 1-3 表 明期 20 ms の時間構造を有する黄色パルス光による終夜照明時のデューティー比が秋ギク‘神馬’の発蕾率，開花率および形質に及ぼす影響

デューティー比（%）	発蕾率[z]（%）	定植93日後 開花率（%）	定植93日後 茎長（cm）	定植93日後 節数	花弁の展開異常
無処理	100	100	45.4 a[y]	30.1 a	無
9.1	100	100	50.7 a	30.8 a	無
16.7	100	100	54.1 a	31.9 a	無
50	100	100	77.4 b	42.0 b	有
100	100	56	98.4 c	46.7 c	有

[z] 定植70日後の2009年2月9日における発蕾率を示す

[y] 表中の同一カラム内の同一英小文字間にはTukeyのHSD検定により5%水準で有意な差がないことを示す（n ＝ 3）

3 考　察

石倉・村上（2006）は，秋ギク‘神馬’に対し，ピーク波長 640 nm の赤色 LED を用いて，秒単位で明期と暗期を繰り返して間欠照明を行った場合，間欠照明における明期と暗期の比率が異なると開花抑制効果に差が生じることを見いだした．具体的には，明期はすべて 1 秒とし，0（連続光），1，2，5 および 9 秒の異なる暗期を設定し，照明時のキク茎頂付近の放射照度は 250 mW・m^{-2} として，定植日から 48 日間，22:00～2:00 に間欠照明を行い，発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響を検討した．その結果，暗期が 0，1 および 2 秒と比較して，暗期が 5 および 9 秒では開花抑制効果が著しく小さく，暗期の設定値が大きいほど開花への影響が小さくなることを確認している（石倉・村上，2006；石倉，2008）．このときの暗期 0，1，2，5 および 9 秒に対応するデューティー比は，順に 100，50，33.3，16.7 および 10%であった．

本項においても，黄色光をパルス化して照射した場合，前述の赤色 LED 関連実験と同様に，デューティー比が小さいほど，生育への影響も小さくなった．照明時のキク茎頂付近の放射照度を 40 mW･m^{-2} とした場合，デューティー比が 9.1 および 16.7%であれば，秋ギク‘神馬’の発蕾および形質に有意な影響を及ぼすことなく適用できることが明らかとなった．また，放射照度が 40 mW･m^{-2} の場合，秋ギク‘神馬’に有意な影響を及ぼすことなく適用できるデューティー比の上限値は 16.7～50%に存在することが示唆され，キクに対する黄色光照射の影響を軽減するためには，少なくとも 50%より小さいデューティー比によるパルス化の有効性が検証できたと考えている．

防蛾に有効な最低照度は 1～2 lx（1.2～3.2 mW･m^{-2} 相当）以上とされている（内田ら，1978；藪，1999）．また，最大の防蛾効果を得る観点から，防蛾を目的とする照明では，終夜照明が採用されている（島内ら，2010；八瀬，2004）．以上を踏まえて，本項では，これらの 2 つを満たす照明条件として，終夜照明下での放射照度 40 mW･m^{-2} を設定した．しかしながら，本項で実施したのは，特定の放射照度下のみの検討であり，今後は，黄色光をパルス化した場合に適用できる放射照度の範囲を明らかにする必要があると考えられた．

第 2 項　黄色パルス光の放射照度とキクの開花反応特性

ヤガ類成虫の飛翔行動抑制に効果的とされる明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光（尹ら，2010；2011；2012）のデューティー比は 20%であり，前項で明らかにしたキクに適用できるデューティー比の範囲にあるものの，適用可能な放射照度については十分な検討がなされていない．そこで，明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を異なる放射照度で輪ギク，小ギクおよびスプレーギクに照射し，発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響を明らかにすることで，前項では未解明であった切り花ギクに適用できる放射照度の範囲を特定しようと試みた．

1　材料および方法

共通する栽培概要および調査方法

供試した輪ギク，小ギクおよびスプレーギクにおいて，夏秋ギク型の品種は，株間 12 cm×条間 12 cm の 5 列×5 条で発根苗 25 株を地床へ定植し，なりゆきの温度管理下で無摘心栽培した．一方，秋ギク型の品種は，容量 6.2 liter（D 15 cm×W 32 cm×H 13 cm）のプランターへ 3 株ずつ定植して，日最低気温が 15℃を下回らないように管理したプラスチックハウス内で無摘心栽培した．すべて第 1 節第 1 項と同じ肥料を用い，夏秋ギク型の品種には，25 株当たり輪ギクで 91 g，小ギクおよびスプレーギクでは 50 g を定植 7 日後に施与した．また，秋ギク型の品種には，1 プランター当たり輪ギクで 9 g，小ギクおよびスプレーギクでは 5 g を定植 7 日後に施与した．供試光源には, 第 1 節第 2 項と同じ LY-LED（第 1-6 図）のチップを 24 個実装した LED モジュールを，短波長カットフィルタを装着した状態で用いた．第 1 節第 1 項に準じ，供試光源を設置し，放射照度を設定した. 黄色パルス光の時間構造は, 防蛾に有効とされる明期 20 ms／暗期 80 ms（尹ら，2010；2011；2012）に設定した．夏秋ギク型の品種では，各区の周縁部の 16 株を除く 9 株について，秋ギク型の品種では，1 区 9 株（3 プランター）について，発蕾日および開花日を調査し，定植日から発蕾，開花までの日数をそれぞれ発蕾所要日数および到花日数とした．加えて，開花日に地際から採花し，切り花形質を調査した．なお，花房型は，森ら（2007）の小ギクに関する報告に基づいて分類（第 1-19 図）した．また，道園ら（2012）のスプレーギクについての報告に準じ，一次側枝数，第 4 側枝長，第 4 側枝と主茎との着生角度を調査した．花色は，目視により確認した．

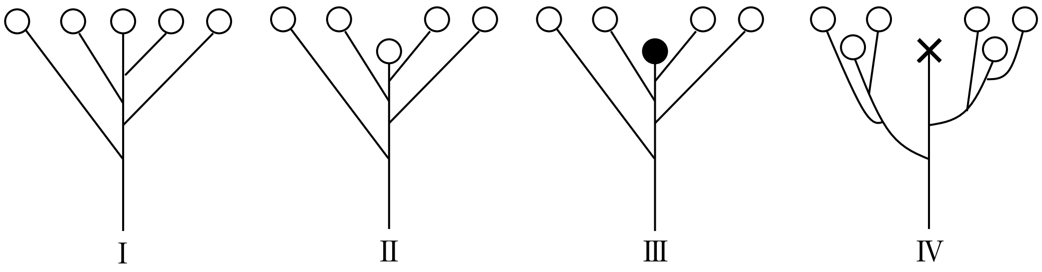
黄色パルス光の放射照度と輪ギクの開花反応

夏秋ギク型輪ギク品種の開花反応

主要な夏秋ギク型輪ギクであり，花色が白色の‘岩の白扇’を 2011 年 5 月 12 日に挿し芽し，5 月 27 日に定植した．連続光区およびパルス光区の 2 区を設け，LY-LED モジュール点灯時のキクの茎頂付近における放射照度を 0，5，20 および 50 mW･m^{-2} とし，0 mW･m^{-2} を除く処理区では，第 1 節第 1 項の方法に準じ所定の放射照度を確保しつつ，定植日から 8 月 19 日までの 87 日間，毎日 17:00～7:00 まで終夜照明した．

秋ギク型輪ギク品種の開花反応

主要な秋ギク型輪ギクであり，花色が白色の‘神馬’および‘精興の誠’，黄色の‘精興黄金’，赤色の‘花秀芳’の 4 品種を供試した. 2012 年 8 月 27 日に挿し芽し, 9 月 12 日に定植した. LY-LED



第 1-19 図　花房型の模式図（森ら（2007）の図を一部改変）
○ 開花，● 未開花，× 発育停止

モジュール点灯時のキクの茎頂付近における放射照度を 0，20，35 および 50 mW･m^{-2} とし，第 1 節第 1 項の方法に準じて所定の放射照度を確保しつつ，定植日から 11 月 25 日までの 74 日間，毎日 16:30～7:30 まで終夜照明した．

黄色パルス光の放射照度と小ギクの開花反応

夏秋ギク型小ギク品種の開花反応

実験には，予備実験の結果に基づき，電照による開花制御が可能な夏秋ギク型小ギクとして，花色が白色の‘白鳥’，赤色の‘やよい’および‘花秀美’の 3 品種を用いた．

夏秋ギク型小ギク品種については, 2012 年 4 月 28 日に挿し芽し, 5 月 15 日に定植した. LY-LED モジュール点灯時のキクの茎頂付近における放射照度は，0，20，35 および 50 mW･m^{-2} とし，定植日から 8 月 17 日までの 94 日間，毎日 18:00～6:00 まで終夜照明した．

秋ギク型小ギク品種の開花反応

花色が黄色の‘金秀’および‘お吉’，赤色の‘沖の乙女’および‘沖ピンク’の 4 品種を用いた．2012 年 8 月 27 日に挿し芽し，9 月 12 日に定植した．LY-LED モジュール点灯時のキクの茎頂付近における放射照度を 0, 20, 35 および 50 mW･m^{-2} とし, 定植日から 11 月 22 日までの 71 日間, 毎日 16:30～7:30 まで終夜照明した．

黄色パルス光の放射照度とスプレーギクの開花反応

夏秋ギク型スプレーギク品種の開花反応

実験には，予備実験の結果に基づき，電照による開花制御が可能な夏秋ギク型スプレーギクとして，花色が黄色と赤色の覆輪である‘セイスーザ’および‘セイロカル’，淡桃色の‘ロアール’の 3 品種用いた．実験方法は，前述の夏秋ギク型小ギク品種についての実験に準じて行った．

秋ギク型スプレーギク品種の開花反応

実験には，花色が白色の‘ホワイトリネカー’，桃色の‘セイローザ’および‘舞風車’，黄色の‘イエロープーマ’の 4 品種を用いた．実験方法は，前述の秋ギク型小ギク品種についての実験に準じて行った．

2　結　果

黄色パルス光の放射照度と輪ギクの開花反応

夏秋ギク型輪ギク品種‘岩の白扇’の開花反応

発蕾所要日数は，無処理区の 39.3 日と比較して，連続光の 5 mW･m^{-2} 区と，パルス光の 5，20 および 50 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，連続光の 20 mW･m^{-2} 区で 9.3 日，連続光の 50 mW･m^{-2} 区では 17.4 日増加し，有意な差が見られた（第 1-20 図）.

到花日数は，無処理区の 68.7 日と比較して，パルス光の 5 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，連続光の 5 mW･m^{-2} 区で 3.3 日，連続光の 20 mW･m^{-2} 区で 19.3 日，パルス光の 20 mW･m^{-2} 区で 3.9 日, パルス光の 50 mW･m^{-2} 区では 5.4 日増加し有意な差が見られた（第 1-20 図）.

定植 50 日後の発蕾率は，すべての区において 100%であったが，定植 84 日後の開花率は，連続光の 50 mW･m^{-2} 区のみ 56%となり，その他の区では，すべて 100%であった（第 1-4 表）.

定植 84 日後の茎長は，無処理と比較して，連続光の 5，20 および 50 mW･m^{-2} 区との間に有意な差が見られ，放射照度が大きいほど増加する傾向が見られた．また，定植 84 日後の茎長は，無処理と比較して，パルス光の 5 および 20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，パルス光の 50 mW･m^{-2} 区との間には有意な差が見られた（第 1-4 表）.

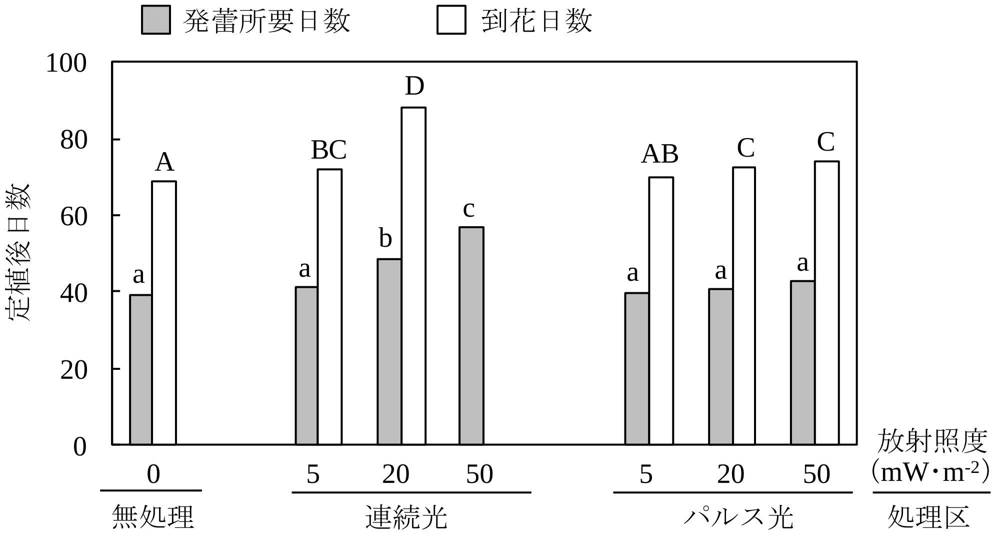
定植 84 日後の節数は，前述の茎長と同じ結果であった（第 1-4 表）.

花弁の展開異常は, 連続光の 20 および 50 mW･m^{-2} 区で見られたが, 他区では見られなかった（第 1-4 表）.

秋ギク型輪ギク品種の開花反応

放射照度と発蕾所要日数との関係における品種間差を定量することを意図して回帰直線を推定した．‘神馬’，‘精興の誠’，‘精興黄金’および‘花秀芳’の発蕾所要日数 Y_1（日）と茎頂付近の放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，一次回帰式で近似できた（第 1-21 図）. 発蕾所要日数は，‘神馬’（第 1-21 図Ⅰ）では，0 mW･m^{-2} 区の 22.6 日と比較して，20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，35 mW･m^{-2} 区で 1.7 日，50 mW･m^{-2} 区では 4.3 日大きく，有意な差が見られた．‘精興の誠’（第 1-21 図Ⅱ）では，0 mW･m^{-2} 区の 24.0 日と比較して，20 および 35 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，50 mW･m^{-2} 区では 2.2 日大きく，有意な差が見られた．‘精興黄金’（第 1-21 図Ⅲ）では，0 mW･m^{-2} 区の 22.8 日と比較して，20 mW･m^{-2} 区で 2.2 日，35 mW･m^{-2} 区で 5.0 日，50 mW･m^{-2} 区では 8.8 日大きく，有意な差が見られた．‘花秀芳’（第 1-21 図Ⅳ）では，0 mW･m^{-2} 区の 22.0 日と比較して，20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，35 mW･m^{-2} 区で 3.1 日，50 mW･m^{-2} 区では 3.0 日大きく，有意な差が見られた.

到花日数 Y_2（日）と茎頂付近の放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，発蕾所要日数と同様に，一次回帰式で近似できた（第 1-21 図）. 到花日数は，‘神馬’（第 1-21 図Ⅰ）では，0 mW･m^{-2} 区の 47.9 日と比較して，20 および 35 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，50 mW･m^{-2} 区で 5.8 日開花が遅延し，有意な差が見られた．‘精興の誠’（第 1-21 図Ⅱ）では，0 mW･m^{-2} 区の 48.3 日と比較して，20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，35 mW･m^{-2} 区で 4.3 日，



第 1-20 図　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が夏秋ギク‘岩の白扇’の発蕾所要日数および到花日数に及ぼす影響

図中の同一英大文字間および同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（n = 9）

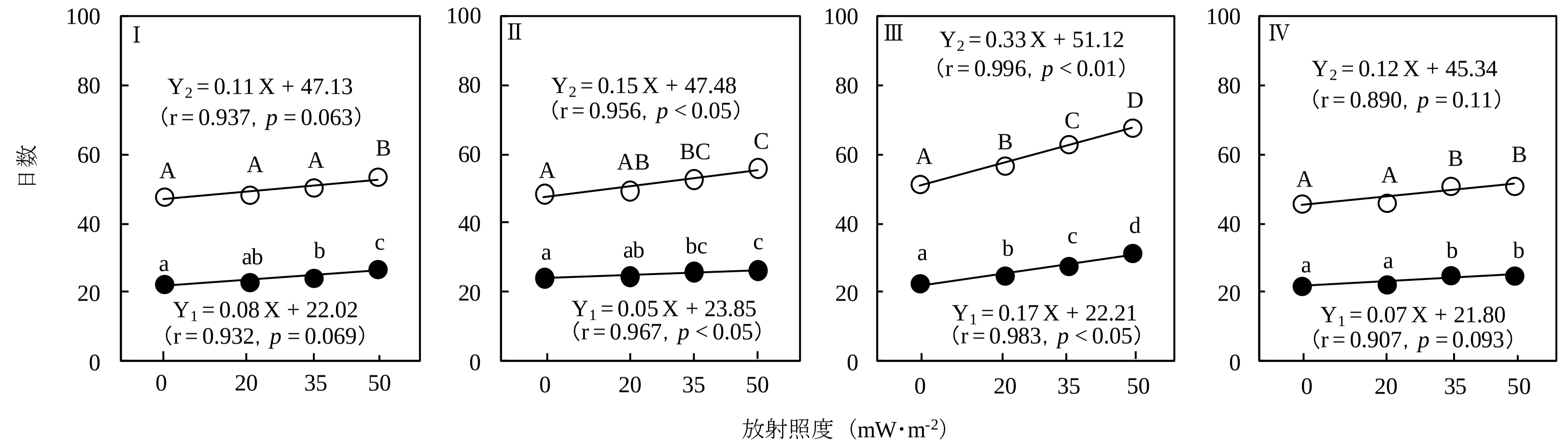
放射照度は LY-LED モジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近の値を示す

連続光の 50 mW･m^{-2} 区における到花日数は，定植 84 日後においても未開花株があったため記載していない

第 1-4 表　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が夏秋ギク型輪ギク‘岩の白扇’の切り花形質に及ぼす影響

処理区	放射照度[z] (mW・m^{-2})	発蕾率[y] (%)	定植84日後 開花率 (%)	定植84日後 茎長 (cm)	定植84日後 節数	花弁の展開異常
無処理	0	100	100	56.7 a[x]	31.2 a	無
連続光	5	100	100	61.8 b	31.6 ab	無
	20	100	100	76.7 c	39.7 c	有
	50	100	56	87.7 d	46.9 d	有
パルス光	5	100	100	56.8 a	31.2 a	無
	20	100	100	59.4 ab	31.2 a	無
	50	100	100	63.2 b	33.6 b	無

[z] 放射照度はLY-LEDモジュールを一時的に連続点灯させたときの値を示す
[y] 定植50日後の2011年7月16日における発蕾率を示す
[x] 表中の同一カラム内の同一英小文字間にはTukeyのHSD検定により5%水準で有意な差がないことを示す（n ＝ 9）



第 1-21 図　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が秋ギク型輪ギク品種の発蕾所要日数および到花日数に及ぼす影響

Ⅰ‘神馬’，Ⅱ‘精興の誠’，Ⅲ‘精興黄金’，Ⅳ‘花秀芳’

○ 発蕾所要日数，● 到花日数

図中の同一英大文字間および同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（$n = 3$）

放射照度は LY-LED モジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近の値を示す

50 mW･m^{-2}区では 7.5 日開花が遅延し，有意な差が見られた．‘精興黄金’（第 1-21 図Ⅲ）では，0 mW･m^{-2}区の 51.6 日と比較して，20 mW･m^{-2}区で 5.3 日，35 mW･m^{-2}区で 11.5 日，50 mW･m^{-2}区では 16.3 日開花が遅延し，有意な差が見られた．‘花秀芳’（第 1-21 図Ⅳ）では，0 mW･m^{-2}区の 45.9 日と比較して，20 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったが，35 および 50 mW･m^{-2}区では，ともに 5.1 日開花が遅延し，有意な差が見られた．

切り花長は，‘神馬’では，0 mW･m^{-2}区と比較して，20 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったが，0 mW･m^{-2}区と 35 および 50 mW･m^{-2}区との間に有意な差が見られた（第 1-5 表）．‘精興の誠’および‘精興黄金’では，0 mW･m^{-2}区とその他の処理区間に，それぞれ有意な差が見られた．‘花秀芳’では，各処理区間に有意な差は見られなかった．

切り花重は，‘神馬’および‘花秀芳’では，各処理区間に有意な差は見られなかった（第 1-5 表）．‘精興の誠’および‘精興黄金’では，0 mW･m^{-2}区と比較して，20 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったものの，0 mW･m^{-2}区と 35 および 50 mW･m^{-2}区との間に有意な差が見られ，放射照度が大きいほど増加した．

切り花節数は，‘神馬’，‘精興の誠’および‘精興黄金’では，0 mW･m^{-2}区と比較して，20 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったものの，0 mW･m^{-2}区と 35 および 50 mW･m^{-2}区との間に有意な差が見られ，放射照度が大きいほど増加した（第 1-5 表）．‘花秀芳’では，各処理区間に有意な差は見られなかった．

花首長は，‘神馬’および‘花秀芳’では，各処理区間に有意な差は見られなかった（第 1-5 表）．‘精興の誠’および‘精興黄金’では，0 mW･m^{-2}区と比較して，20 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったものの，0 mW･m^{-2}区と 35 および 50 mW･m^{-2}区との間に有意な差が見られた．

舌状花数は，‘神馬’では，各処理区間に有意な差は見られなかった（第 1-5 表）．‘精興の誠’および‘精興黄金’では，0 および 20 mW･m^{-2}区間に有意な差は見られず，‘花秀芳’では，0 mW･m^{-2}区と 20 および 35 mW･m^{-2}区の間に有意な差は見られなかったが，これらの 3 品種では，0 および 50 mW･m^{-2}区間に有意な差が見られた．

管状花数は，‘神馬’では，各処理区間に有意な差は見られなかった（第 1-5 表）．‘精興の誠’では，0 および 20 mW･m^{-2}区間に有意な差は見られなかったが，0 mW･m^{-2}区と 35 および 50 mW･m^{-2}区の間に有意な差が見られた．‘精興黄金’では，0 mW･m^{-2}区と 20，35 および 50 mW･m^{-2}区の間に有意な差が見られた．‘花秀芳’では，0 mW･m^{-2}区と 20 および 35 mW･m^{-2}区の間に有意な差は見られなかったが，0 および 50 mW･m^{-2}区間に有意な差が見られた．

花弁の展開異常は，供試した 4 品種では，いずれの処理区においても見られなかった（第 1-5 表）．

花色は，すべての品種において，処理区間で目視により差がないようであった．

第 1-5 表　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が数種の秋ギク型輪ギクの切り花形質に及ぼす影響

品　種	放射照度[z]（mW・m^{-2}）	発蕾所要日数	到花日数	切り花長（cm）	切り花節数	花弁の展開異常
神馬	0	22.6 a[y]	47.9 a	41.7 a	29.9 a	無
	20	23.1 ab	48.4 a	44.4 a	30.4 a	無
	35	24.3 b	50.6 a	50.0 b	33.3 b	無
	50	26.9 c	53.7 b	53.0 b	34.2 b	無
精興の誠	0	24.0 a	48.3 a	32.1 a	26.0 a	無
	20	24.4 ab	49.2 ab	37.7 b	27.4 ab	無
	35	25.8 bc	52.6 bc	41.5 bc	29.0 bc	無
	50	26.2 c	55.8 c	46.5 c	30.0 c	無
精興黄金	0	22.8 a	51.6 a	40.9 a	26.7 a	無
	20	25.0 b	56.9 b	48.2 b	27.8 a	無
	35	27.8 c	63.1 c	56.3 c	30.9 b	無
	50	31.6 d	67.9 d	65.9 d	34.2 c	無
花秀芳	0	22.0 a	45.9 a	56.9 a	29.4 a	無
	20	22.4 a	46.1 a	57.3 a	29.7 a	無
	35	25.1 b	51.0 b	65.4 a	30.7 a	無
	50	25.0 b	51.0 b	63.5 a	31.1 a	無

[z] 放射照度はLY-LEDモジュールを一時的に連続点灯させたときの値を示す

[y] 同一品種における同一カラム内の同一英小文字間にはTukeyのHSD検定 により有意な差がないことを示す（n = 3）

黄色パルス光の放射照度と小ギクの開花反応

夏秋ギク型小ギク品種の開花反応

放射照度と発蕾所要日数との関係における品種間差を定量することを意図して回帰直線を推定した．‘白鳥’，‘やよい’ および ‘花秀美’ の発蕾所要日数 Y_1（日）と茎頂付近の放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，一次回帰式で近似できた（第 1-22 図）．しかしながら，‘白鳥’（第 1-22 図Ⅰ）では，各処理区間に有意な差は見られなかった．‘やよい’（第 1-22 図Ⅱ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，35 mW･m^{-2} 区で 4.4 日大きかったものの，20，35 および 50 mW･m^{-2} 区の 3 処理区間に有意な差は見られなかった．‘花秀美’（第 1-22 図Ⅲ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，35 mW･m^{-2} 区で 7.0 日，50 mW･m^{-2} 区では 9.0 日大きく，有意な差が見られた．

到花日数 Y_2（日）と茎頂付近の放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，発蕾所要日数と同様に，一次回帰式で近似できた（第 1-22 図）．なお，‘白鳥’（第 1-22 図Ⅰ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して 20 mW･m^{-2} 区に有意な差は見られず，35 mW･m^{-2} 区で 7.5 日，50 mW･m^{-2} 区では 12.4 日の遅延が見られた．‘やよい’（第 1-22 図Ⅱ）でも，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 mW･m^{-2} 区に有意な差は見られず，35 mW･m^{-2} 区で 9.9 日，50 mW･m^{-2} 区では 17.6 日の遅延が見られた．‘花秀美’（第 1-22 図Ⅲ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 mW･m^{-2} 区で 5.0 日，35 mW･m^{-2} 区で 8.2 日，50 mW･m^{-2} 区では 12.3 日遅延し，有意な差が見られた．

切り花長は，放射照度が高いほど大きく，‘白鳥’では 50 mW･m^{-2} 区で，‘やよい’では 35 および 50 mW･m^{-2} 区で，‘花秀美’では 20，35 および 50 mW･m^{-2} 区で，0 mW･m^{-2} 区との間に有意な差が見られた（第 1-6 表）．

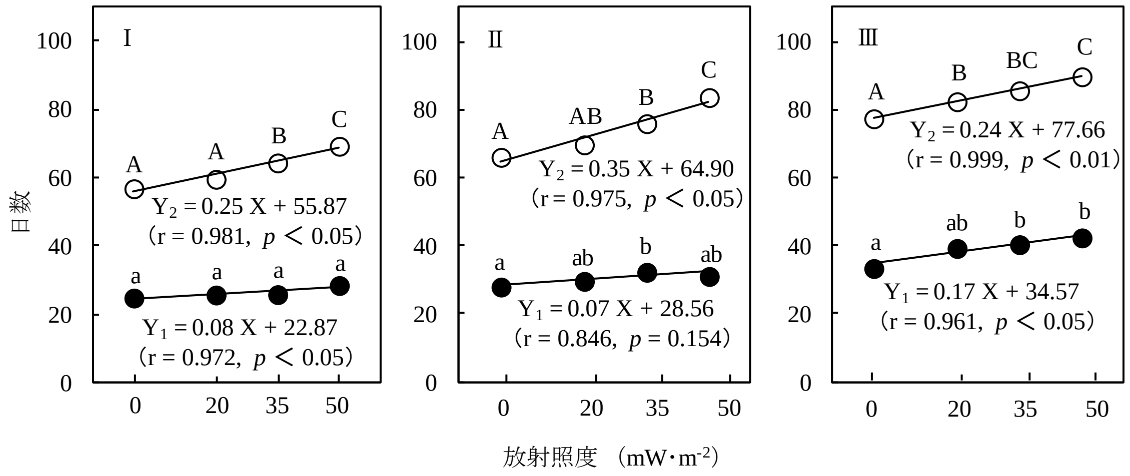
切り花重は，‘やよい’では 20 mW･m^{-2} 区と 50 mW･m^{-2} 区との間に有意な差が見られたものの，すべての品種において，0 mW･m^{-2} 区とその他の処理区間に有意な差は見られなかった（第 1-6 表）．

主茎節数は，‘白鳥’では 50 mW･m^{-2} 区で，‘花秀美’では 35 および 50 mW･m^{-2} 区で，0 mW･m^{-2} 区との間に有意な差が見られ，放射照度が高いほど大きかった（第 1-6 表）．‘やよい’では，0 および 35 mW･m^{-2} 区間に有意な差が見られたものの，20，30 および 50 mW･m^{-2} 区の 3 処理区間に有意な差は見られなかった．

一次側枝数は，‘白鳥’では，各処理区間に有意な差は見られなかった．‘やよい’では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 および 35 mW･m^{-2} 区に有意な差は見られなかったが，50 mW･m^{-2} 区は，有意に小さかった（第 1-6 表）．‘花秀美’では，0 および 20 mW･m^{-2} 区間に有意な差が見られたものの，20，35 および 50 mW･m^{-2} 区の 3 処理区間に有意な差は見られなかった．

総花蕾数は，‘白鳥’および‘花秀美’では，各処理区間に有意な差は見られなかった．‘やよい’では，0 mW･m^{-2} 区と比較して 20 および 35 mW･m^{-2} 区に有意な差は見られなかったが，50 mW･m^{-2} 区では，有意に大きかった（第 1-6 表）．

花房型は，‘白鳥’および‘花秀美’では，処理区による一定の傾向は見られなかったが，‘や



第 1-22 図　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が夏秋ギク型小ギク品種の発蕾所要日数および到花日数に及ぼす影響

Ⅰ‘白鳥’，Ⅱ‘やよい’，Ⅲ‘花秀美’，○ 発蕾所要日数，● 到花日数

図中の同一英大文字間および同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（$n = 9$）

放射照度は LY-LED モジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近の値を示す

第 1-6 表　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が夏秋ギク型小ギク品種の切り花形質に及ぼす影響

品 種	放射照度[z] (mW・m^{-2})	切り花長 (cm)	切り花重 (g)	主茎節数	一次側枝数 (本)	総花蕾数 (個)	花房型[x] (%) Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
白鳥	0	76.4 a[y]	57.3 a	33.2 a	7.8 a	9.6 a	33	67	0	0
	20	81.0 a	63.4 a	33.6 a	6.4 a	10.4 a	0	100	0	0
	35	85.1 a	69.3 a	36.7 a	7.3 a	14.1 a	11	89	0	0
	50	95.4 b	70.7 a	38.2 b	7.3 a	12.9 a	11	89	0	0
やよい	0	100.7 a	72.1 ab	39.2 a	8.4 b	33.1 a	0	100	0	0
	20	105.5 a	67.9 a	39.3 a	7.7 b	32.2 a	0	89	0	11
	35	119.1 b	75.1 ab	42.6 b	7.1 ab	41.7 ab	0	56	0	44
	50	123.3 b	86.9 b	41.2 ab	5.8 a	60.4 b	0	11	0	89
花秀美	0	113.7 a	77.6 a	37.1 a	4.3 a	33.0 a	0	11	0	89
	20	121.7 b	86.3 a	43.4 ab	5.2 b	29.8 a	0	22	0	78
	35	125.7 bc	92.8 a	44.9 b	4.7 ab	28.8 a	0	33	0	67
	50	130.7 c	88.0 a	47.1 b	5.1 ab	28.3 a	0	11	0	89

[z] LY-LEDモジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近における放射照度を示す

[y] 同一品種における同一カラム内の同一英小文字間にはTukeyのHSD検定により5%水準で有意な差がないことを示す（n = 9）

[x] 第1-19図の花房型を示す

よい’では，放射照度が高いほど，Ⅱ型が減少し，Ⅳ型が増加する傾向が見られた（第 1-6 表）.

花色は，すべての品種において，処理区間で目視により差がないようであった.

第 4 側枝長は，‘白鳥’（第 1-23 図Ⅰ）および‘やよい’（第 1-23 図Ⅱ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して 20 および 35 mW･m^{-2} 区に有意な差は見られなかったが，50 mW･m^{-2} 区では，有意に大きかった.‘花秀美’（第 1-23 図Ⅲ）では，各処理区間に有意な差は見られなかった.

第 4 側枝着生角度は，すべての品種において，0 mW･m^{-2} 区とその他の処理区間に有意な差は見られなかった（第 1-23 図Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ）.

秋ギク型小ギク品種の開花反応

秋ギク型小ギク品種についても，夏秋ギク型小ギク品種と同様に，放射照度と発蕾所要日数との関係における品種間差を定量することを意図して回帰直線を推定した．‘金秀’，‘お吉’，‘沖の乙女’および‘沖ピンク’の発蕾所要日数 Y_1（日）と茎頂付近の放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，一次回帰式で近似できた（第 1-24 図）.‘金秀’（第 1-24 図Ⅰ）および‘沖ピンク’（第 1-24 図Ⅳ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，50 mW･m^{-2} 区で 3.6～3.8 日大きく，有意な差が見られた.‘お吉’（第 1-24 図Ⅱ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，35 mW･m^{-2} 区で 3.9 日，50 mW･m^{-2} 区では 7.0 日遅延し，有意な差が見られた.‘沖の乙女’（第 1-24 図Ⅲ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 mW･m^{-2} 区で 1.8 日，35 mW･m^{-2} 区で 5.0 日，50 mW･m^{-2} 区では 7.0 日遅延し，有意な差が見られた.

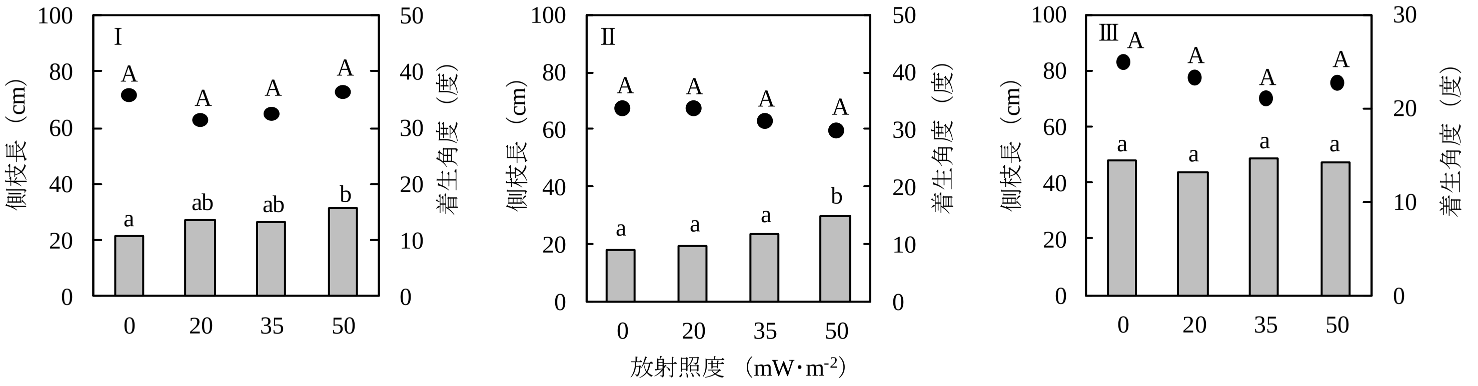
到花日数 Y_2（日）と茎頂付近の放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，発蕾所要日数と同様に，一次回帰式で近似できた（第 1-24 図）. 0 mW･m^{-2} 区と比較して，‘金秀’（第 1-24 図Ⅰ）では 50 mW･m^{-2} 区で 6.4 日，‘お吉’（第 1-24 図Ⅱ）および‘沖ピンク’（第 1-24 図Ⅳ）では 35 および 50 mW･m^{-2} 区で 7.4～12.6 日，‘沖の乙女’（第 1-24 図Ⅲ）では 20，35 および 50 mW･m^{-2} 区で 3.0～11.6 日遅延し，有意な差が見られた.

切り花長は，すべての品種において放射照度が高いほど大きく，0 mW･m^{-2} 区と 35 および 50 mW･m^{-2} 区間に有意な差が見られた（第 1-7 表）.

切り花重は，‘金秀’および‘沖の乙女’では，各処理区間に有意な差は見られなかった.‘お吉’および‘沖ピンク’では，0 mW･m^{-2} 区と比較して 50 mW･m^{-2} 区で有意に大きかった（第 1-7 表）.

主茎節数は，‘金秀’，‘お吉’および‘沖ピンク’では， 0 mW･m^{-2} 区と比較して 50 mW･m^{-2} 区で有意に大きかった.‘沖の乙女’では，0 mW･m^{-2} 区と比較して 35 および 50 mW･m^{-2} 区で放射照度が高いほど有意に大きかった（第 1-7 表）.

一次側枝数は，‘金秀’，‘お吉’および‘沖ピンク’では，各処理区間に有意な差は見られなかった.‘沖の乙女’では，0 mW･m^{-2} 区と比較して 35 および 50 mW･m^{-2} 区では有意に小さかった（第 1-7 表）.

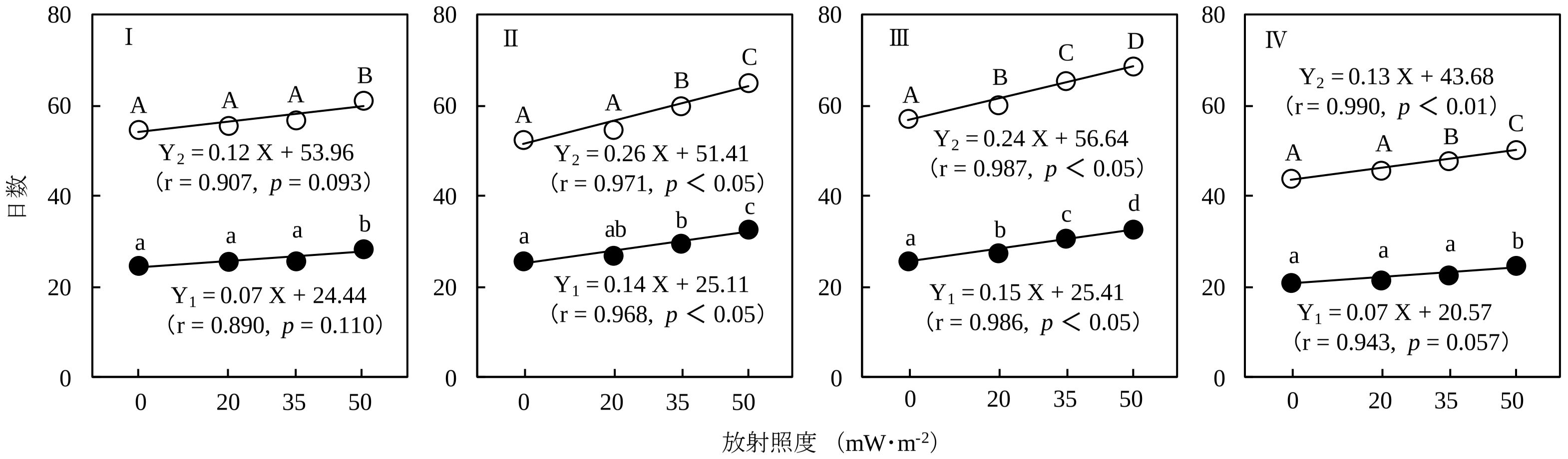


第 1−23 図　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が夏秋ギク型小ギク品種の第 4 側枝長および第 4 側枝着生角度に及ぼす影響

Ⅰ‘白鳥’，Ⅱ‘やよい’，Ⅲ‘花秀美’，■ 第 4 側枝長，● 第 4 側枝着生角度

図中の同一英大文字間および同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（$n = 9$）

放射照度は LY-LED モジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近の値を示す



第 1-24 図　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が秋ギク型小ギク品種の発蕾所要日数および到花日数に及ぼす影響

Ⅰ‘金秀’，Ⅱ‘お吉’，Ⅲ‘沖の乙女’，Ⅳ‘沖ピンク’

○ 発蕾所要日数，● 到花日数

図中の同一英大文字間および同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（$n = 3$）

放射照度は LY-LED モジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近の値を示す

第 1-7 表　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が秋ギク型小ギク品種の切り花形質に及ぼす影響

品 種	放射照度[z] (mW･m^{-2})	切り花長 (cm)	切り花重 (g)	主茎節数	一次側枝数 (本)	総花蕾数 (個)	花房型[x] (%)			
							Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
金秀	0	55.4 a[y]	39.3 a	30.1 a	10.8 a	16.0 a	22	78	0	0
	20	58.4 a	44.7 a	30.6 a	10.9 a	17.8 a	33	67	0	0
	35	62.2 b	47.3 a	30.7 a	10.1 a	18.3 a	0	100	0	0
	50	69.1 c	48.4 a	33.2 b	8.9 a	15.2 a	0	100	0	0
お吉	0	54.2 a	46.5 a	31.2 a	16.2 a	45.7 a	11	89	0	0
	20	58.5 ab	47.3 a	32.1 a	16.7 a	45.9 a	11	89	0	0
	35	65.8 b	55.9 ab	34.0 ab	13.3 a	43.2 a	0	100	0	0
	50	76.3 c	61.6 b	36.9 b	12.9 a	41.8 a	0	100	0	0
沖の乙女	0	67.3 a	61.8 a	29.9 a	10.7 b	26.6 a	0	100	0	0
	20	69.2 a	58.9 a	30.6 a	8.9 ab	20.7 a	0	100	0	0
	35	77.1 b	64.6 a	32.7 b	6.8 a	20.7 a	0	100	0	0
	50	77.4 b	65.8 a	35.8 c	6.1 a	19.2 a	0	100	0	0
沖ピンク	0	62.3 a	39.2 a	29.9 a	13.4 a	22.3 a	100	0	0	0
	20	66.8 ab	44.2 ab	30.1 a	12.9 a	23.8 a	100	0	0	0
	35	70.2 bc	47.1 ab	30.8 ab	11.7 a	25.7 a	56	44	0	0
	50	74.8 c	52.0 b	31.4 b	11.6 a	28.6 a	22	78	0	0

[z] LY-LEDモジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近における放射照度を示す

[y] 同一品種における同一カラム内の同一英小文字間にはTukeyのHSD検定により5%水準で有意な差がないことを示す（n = 3）

[x] 第1-19図の花房型を示す

総花蕾数は，すべての品種において，各処理区間に有意な差は見られなかった（第 1-7 表）．

花房型は，‘金秀’，‘お吉’および‘沖ピンク’では，35 および 50 mW･m^{-2} 区で，Ⅱ型の割合が増加する傾向が見られた．‘沖の乙女’では，いずれの処理区においてもⅡ型となり，処理による影響は見られなかった（第 1-7 表）．

花色は，すべての品種において，処理区間で目視により差がないようであった．

第 4 側枝長は，‘金秀’（第 1-25 図Ⅰ）および‘沖の乙女’（第 1-25 図Ⅲ）では，各処理区間に有意な差は見られなかった．‘お吉’（第 1-25 図Ⅱ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，50 mW･m^{-2} 区で有意に大きかった．‘沖ピンク’（第 1-25 図Ⅳ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，35 および 50 mW･m^{-2} 区では有意に大きかった．

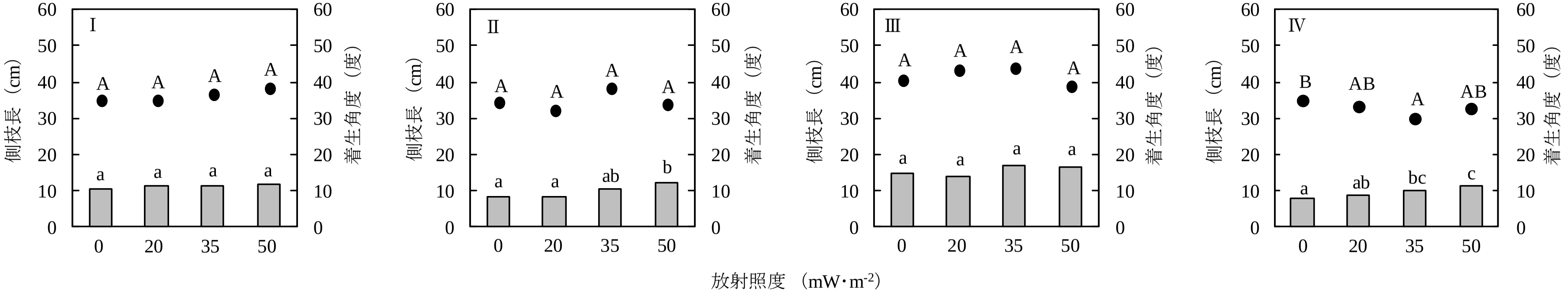
第 4 側枝着生角度は，‘金秀’，‘お吉’および‘沖の乙女’の 3 品種（第 1-25 図Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ）では，各処理区間に有意な差は見られなかった．‘沖ピンク’（第 1-25 図Ⅳ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，35 mW･m^{-2} 区で有意に小さかったが，20，35 および 50 mW･m^{-2} 区間に有意な差は見られなかった．

黄色パルス光の放射照度とスプレーギクの開花反応

夏秋ギク型スプレーギク品種の開花反応

夏秋ギク型スプレーギク品種についても，前述の小ギク品種と同様に，放射照度と，発蕾所要日数および到花日数との関係における品種間差を定量することを意図して回帰直線を推定した．‘セイスーザ’，‘セイロカル’および‘ロアール’の発蕾所要日数 Y_1（日）と茎頂付近の放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，一次回帰式で近似できた（第 1-26 図）．発蕾所要日数は，‘セイスーザ’（第 1-26 図Ⅰ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 および 35 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，50 mW･m^{-2} 区で 3.3 日大きく，有意な差が見られた．‘セイロカル’（第 1-26 図Ⅱ）では，20 および 50 mW･m^{-2} 区，35 および 50 mW･m^{-2} 区との間に有意な差が見られたものの，いずれの区においても，0 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかった．‘ロアール’（第 1-26 図Ⅲ）では，いずれの区においても，0 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかった．

到花日数 Y_2（日）と茎頂付近の放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，発蕾所要日数と同様に，一次回帰式で近似できた（第 1-26 図）．到花日数は，‘セイスーザ’（第 1-26 図Ⅰ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 および 35 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，50 mW･m^{-2} 区で 10.1 日大きく，有意な差が見られた．‘セイロカル’（第 1-26 図Ⅱ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して, 20 および 35 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが, 50 mW･m^{-2} 区で 6.3 日大きく，有意な差が見られた．‘ロアール’（第 1-26 図Ⅲ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，35 および 50 mW･m^{-2} 区で 6.4～6.7 日大きく，有意な差が見られた．



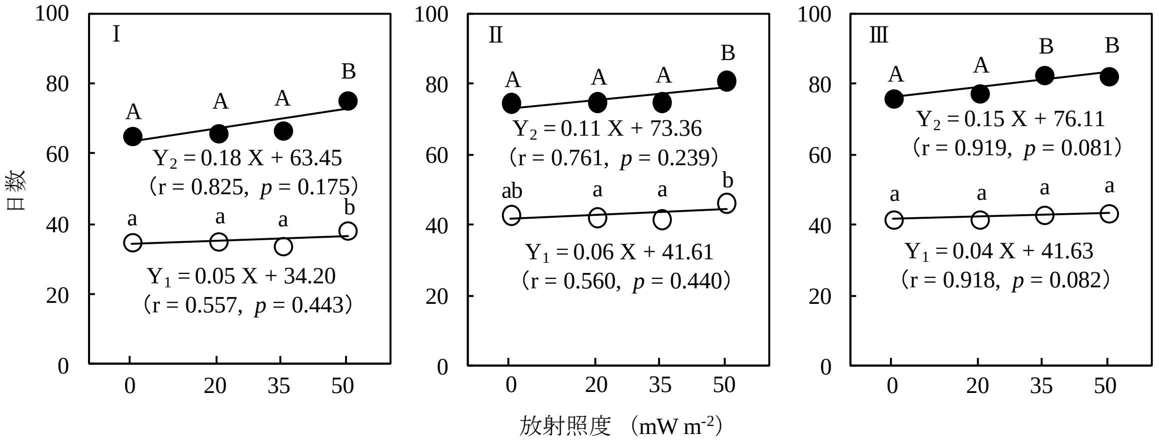
第 1-25 図　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が秋ギク型小ギク品種の第 4 側枝長および第 4 側枝着生角度に及ぼす影響

Ⅰ‘金秀’，Ⅱ‘お吉’，Ⅲ‘沖の乙女’，Ⅳ‘沖ピンク’

□ 第 4 側枝長，● 第 4 側枝着生角度

図中の同一英大文字間および同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（n = 3）

放射照度は LY-LED モジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近の値を示す



第 1-26 図　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が夏秋ギク型スプレーギク品種の発蕾所要日数および到花日数に及ぼす影響

Ⅰ‘セイスーザ’，Ⅱ‘セイロカル’，Ⅲ‘ロアール’，○ 発蕾所要日数，● 到花日数

図中の同一英大文字間および同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（n = 9）

放射照度は LY-LED モジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近の値を示す

切り花長は，‘セイスーザ’および‘セイロカル’では，0 mW･m^{-2}区と比較して，20 および 35 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったが，0 mW･m^{-2}と 50 mW･m^{-2}区間に有意な差が見られた（第 1-8 表）．‘ロアール’では，20，35 および 50 mW･m^{-2}区間に有意な差は見られなかったが，0 mW･m^{-2}区と比較して，すべての区で有意に大きかった（第 1-8 表）．

切り花重は，‘セイスーザ’では，0 mW･m^{-2}区と比較して，20 および 35 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったが，50 mW･m^{-2}区との間に有意な差が見られた（第 1-8 表）．‘セイロカル’では，各処理区間に有意な差は見られなかった（第 1-8 表）．‘ロアール’では，0 mW･m^{-2}区と比較して，20 mW･m^{-2}区との間に有意な差が見られたものの，0 mW･m^{-2}区と 35 および 50 mW･m^{-2}区間に有意な差は見られなかった（第 1-8 表）．

主茎節数は，‘セイスーザ’および‘セイロカル’では，各処理区間に有意な差は見られなかった（第 1-8 表）．‘ロアール’では，0 mW･m^{-2}区と比較して，20 および 35 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったが，50 mW･m^{-2}区で有意に大きかった（第 1-8 表）．

一次側枝数は，‘セイスーザ’では，各処理区間に有意な差は見られなかった（第 1-8 表）．‘セイロカル’では，0 mW･m^{-2}区と比較して，20 および 35 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったが，50 mW･m^{-2}区で有意に少なかった（第 1-8 表）．‘ロアール’では，0 mW･m^{-2}区と比較して，20 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったが，0 mW･m^{-2}区と 35 および 50 mW･m^{-2}区間に有意な差が見られた（第 1-8 表）．

総花蕾数は，‘セイスーザ’および‘セイロカル’では，各処理区間に有意な差は見られなかった（第 1-8 表）．‘セイロカル’では，0 mW･m^{-2}区と比較して，35 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったが，0 mW･m^{-2}区と 20 および 50 mW･m^{-2}区間に有意な差が見られた（第 1-8 表）．

花房型は，‘セイスーザ’では，Ⅰ型，あるいはⅡ型となったが，処理による影響は見られなかった（第 1-8 表）．‘セイロカル’では，放射照度が高いほど，Ⅰ型が増加する傾向が見られた．‘ロアール’では，35 mW･m^{-2}区で他区と異なる割合が見られたが，放射照度に関わらず，Ⅱ型の割合が高かった．

花色は，すべての品種において，処理区間で目視により差がないようであった．

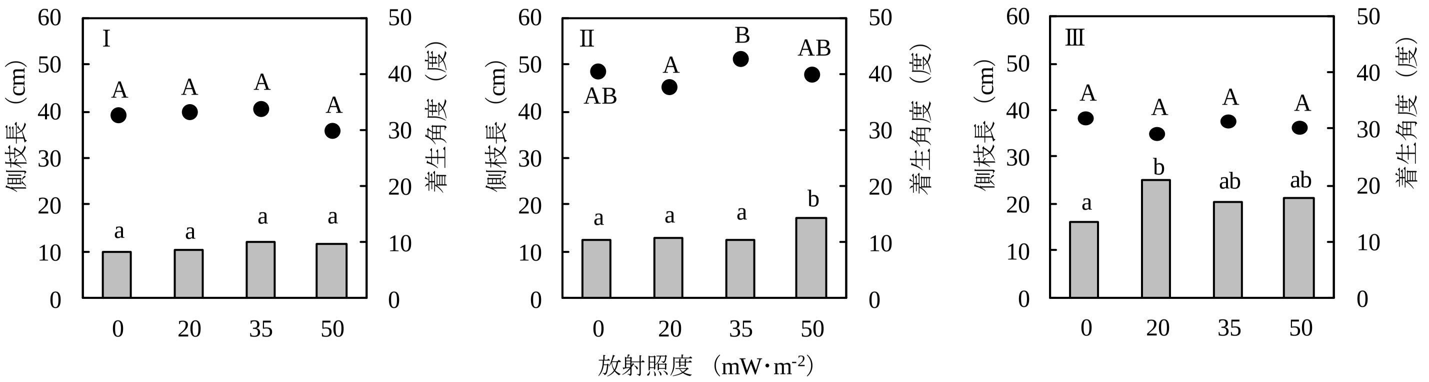
第 4 側枝長は，‘セイスーザ’（第 1-27 図Ⅰ）では，各処理区間に有意な差は見られなかった．‘セイロカル’（第 1-27 図Ⅱ）では，0 mW･m^{-2}区と比較して，20 および 35 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったが，50 mW･m^{-2}区で有意に大きかった．‘ロアール’（第 1-27 図Ⅲ）では，0 mW･m^{-2}区と比較して，35 および 50 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかったが，0 mW･m^{-2}区と 20 mW･m^{-2}区間に有意な差が見られた．

第 4 側枝着生角度は，‘セイスーザ’および‘ロアール’の 2 品種（第 1-27 図Ⅰ，Ⅲ）では，各処理区間に有意な差は見られなかった．‘セイロカル’（第 1-27 図Ⅱ）では, 20 mW･m^{-2}と 35 mW･m^{-2}区間に有意な差が見られたが，いずれの区においても，0 mW･m^{-2}区との間に有意な差は見られなかった．

第 1-8 表　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が夏秋ギク型スプレーギク品種の切り花形質に及ぼす影響

品　種	放射照度[z] (mW･m^{-2})	切り花長 (cm)	切り花重 (g)	主茎節数	一次側枝数 (本)	総花蕾数 (個)	花房型[x] (%) Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
セイスーザ	0	100.0 a[y]	73.3 a	30.6 a	11.7 a	23.1 a	22	78	0	0
	20	99.0 a	69.8 a	31.1 a	11.3 a	22.1 a	56	44	0	0
	35	99.8 a	74.3 a	30.4 a	11.1 a	25.1 a	44	56	0	0
	50	111.2 b	86.6 b	31.1 a	12.2 a	26.6 a	33	67	0	0
セイロカル	0	130.3 a	87.1 a	41.0 a	9.7 b	13.2 a	67	33	0	0
	20	126.5 a	78.6 a	41.3 a	9.0 b	12.6 a	67	33	0	0
	35	133.1 a	94.8 a	41.7 a	10.0 ab	13.1 a	89	11	0	0
	50	149.2 b	95.9 a	43.9 a	8.4 a	11.3 a	100	0	0	0
ロアール	0	129.7 a	66.9 a	44.0 a	6.0 b	16.8 a	0	100	0	0
	20	140.0 b	91.6 b	44.7 ab	5.3 ab	22.7 b	0	100	0	0
	35	139.0 b	74.3 a	45.2 ab	5.1 a	20.3 ab	11	89	0	0
	50	139.8 b	78.4 a	47.0 b	5.2 a	23.1 b	0	100	0	0

[z] LY-LEDモジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近における放射照度を示す
[y] 同一品種における同一カラム内の同一英小文字間にはTukeyのHSD検定により5%水準で有意な差がないことを示す（n = 9）
[x] 第1-19図の花房型を示す



第 1-27 図　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が夏秋ギク型スプレーギク品種の第 4 側枝長および第 4 側枝着生角度に及ぼす影響

Ⅰ‘セイスーザ’，Ⅱ‘セイロカル’，Ⅲ‘ロアール’，■ 第 4 側枝長，● 第 4 側枝着生角度

図中の同一英大文字間および同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（$n = 3$）

放射照度は LY-LED モジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近の値を示す

秋ギク型スプレーギク品種の開花反応

秋ギク型スプレーギク品種についても，前述の夏秋ギク型スプレーギク品種と同様に，放射照度と，発蕾所要日数および到花日数との関係における品種間差を定量することを意図して回帰直線を推定した．‘ホワイトリネカー’，‘セイローザ’，‘イエロープーマ’および‘舞風車’の発蕾所要日数 Y_1（日）と茎頂付近の放射照度 X（mW･m^{-2}）の関係は，一次回帰式で近似できた（第1-28 図）．発蕾所要日数は，‘ホワイトリネカー’（第 1-28 図Ⅰ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，35 mW･m^{-2} 区で 4.6 日，50 mW･m^{-2} 区では 11.3 日大きく，有意な差が見られた．‘セイローザ’（第 1-28 図Ⅱ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 mW･m^{-2} 区で 7.3 日，35 mW･m^{-2} 区で 14.8 日，50 mW･m^{-2} 区では 17.8 日大きく，有意な差が見られた．‘イエロープーマ’（第 1-28 図Ⅲ）では，各処理区間に有意な差は見られなかった．‘舞風車’（第 1-28 図Ⅳ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 mW･m^{-2} 区で 6.2 日，35 mW･m^{-2} 区で 10.4 日，50 mW･m^{-2} 区では 7.9 日大きく，有意な差が見られた．

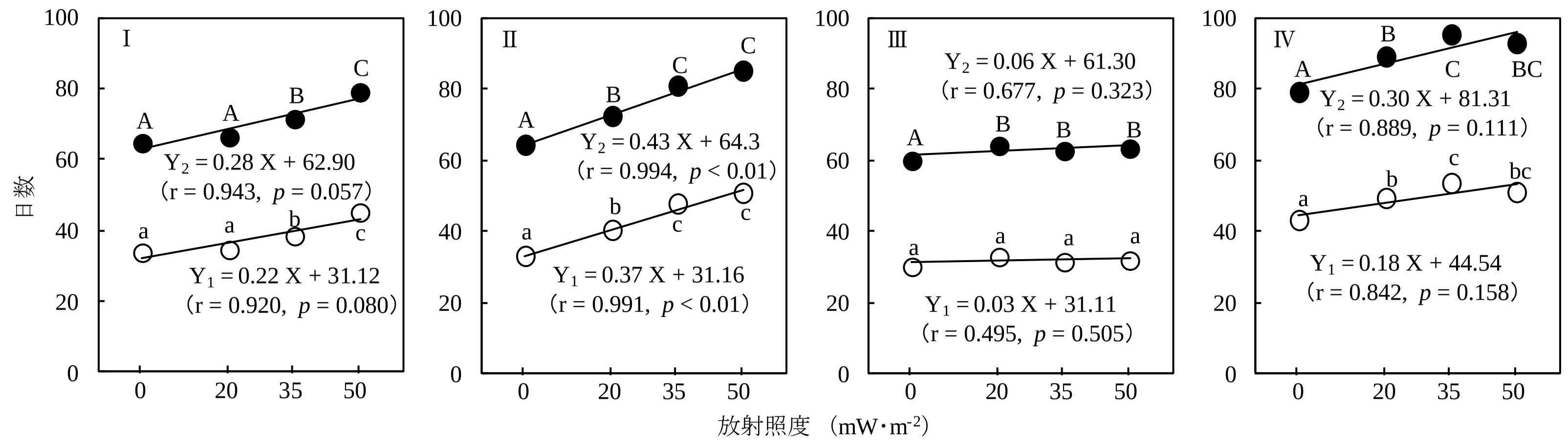
到花日数は，‘ホワイトリネカー’（第 1-28 図Ⅰ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，35 mW･m^{-2} 区で 6.7 日，50 mW･m^{-2} 区では 14.3 日大きく，有意な差が見られた．‘セイローザ’（第 1-28 図Ⅱ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 mW･m^{-2} 区で 8.1 日，35 mW･m^{-2} 区で 16.7 日，50 mW･m^{-2} 区では 20.9 日大きく，有意な差が見られた．‘イエロープーマ’（第 1-28 図Ⅲ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20，35 および 50 mW･m^{-2} 区で 2.8～4.2 日大きく，有意な差が見られた．‘舞風車’（第 1-28 図Ⅳ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20，35 および 50 mW･m^{-2} 区で 10.0～16.2 日大きく，有意な差が見られた．

切り花長は，すべての品種において放射照度が高いほど大きく，‘ホワイトリネカー’では 0 mW･m^{-2} 区と 35 および 50 mW･m^{-2} 区間に，‘セイローザ’および‘舞風車’では 0 mW･m^{-2} 区と 20，35 および 50 mW･m^{-2} 区間に，‘イエロープーマ’では 0 mW･m^{-2} 区と 50 mW･m^{-2} 区間に，それぞれ有意な差が見られた（第 1-9 表）．

切り花重は，‘ホワイトリネカー’および‘セイローザ’では，放射照度が高いほど大きかった（第 1-9 表）．‘ホワイトリネカー’では 0 mW･m^{-2} 区と 50 mW･m^{-2} 区間に，‘セイローザ’では，0 mW･m^{-2} 区と 35 および 50 mW･m^{-2} 区間に，‘舞風車’では 0 mW･m^{-2} 区と 20，35 および 50 mW･m^{-2} 区間に，それぞれ有意な差が見られた．‘イエロープーマ’では，各処理区間に有意な差は見られなかった．

主茎節数は，‘ホワイトリネカー’および‘セイローザ’では，放射照度が高いほど大きかった（第 1-9 表）．‘ホワイトリネカー’では，0 mW･m^{-2} 区と 35 および 50 mW･m^{-2} 区間に，‘セイローザ’および‘舞風車’では，0 mW･m^{-2} 区と 20，35 および 50 mW･m^{-2} 区間に，それぞれ有意な差が見られた．‘イエロープーマ’では，各処理区間に有意な差は見られなかった．

一次側枝数および総花蕾数は，‘ホワイトリネカー’では，放射照度が高いほど減少する傾向にあり，0 mW･m^{-2} 区と 35 および 50 mW･m^{-2} 区間に有意な差が見られた（第 1-9 表）．‘セイローザ’，



第 1-28 図 明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が秋ギク型スプレーギク品種の発蕾所要日数および到花日数に及ぼす影響

Ⅰ‘ホワイトリネカー’，Ⅱ‘セイローザ’，Ⅲ‘イエロープーマ’，Ⅳ‘舞風車’，○ 発蕾所要日数，● 到花日数

図中の同一英大文字間および同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す（$n = 3$）

放射照度は LY-LED モジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近の値を示す

第 1-9 表　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度が秋ギク型スプレーギク品種の切り花形質に及ぼす影響

品種	放射照度[z] (mW・m^{-2})	切り花長 (cm)	切り花重 (g)	主茎節数	一次側枝数 (本)	総花蕾数 (個)	花房型[x] (%)			
							Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
ホワイトリネカー	0	56.6 a[y]	35.4 a	28.1 a	9.8 b	10.8 b	56	44	0	0
	20	70.7 ab	44.6 ab	30.4 ab	9.4 b	10.4 b	33	67	0	0
	35	79.9 b	48.0 ab	32.6 b	7.3 a	8.3 a	0	100	0	0
	50	97.6 c	56.5 b	38.3 c	6.9 a	8.0 a	0	100	0	0
セイローザ	0	61.9 a	44.8 a	26.8 a	8.7 a	9.8 a	33	67	0	0
	20	79.5 b	57.6 ab	31.3 b	8.9 a	10.3 a	0	100	0	0
	35	92.9 bc	66.1 b	34.7 c	8.9 a	9.9 a	0	100	0	0
	50	98.8 c	70.3 b	37.1 c	7.9 a	9.8 a	0	100	0	0
イエロープーマ	0	26.7 a	20.9 a	23.6 a	12.2 a	14.6 a	78	22	0	0
	20	30.2 ab	23.8 a	24.0 ab	15.0 a	17.2 a	100	0	0	0
	35	31.7 ab	24.5 a	24.2 ab	14.9 a	17.4 a	100	0	0	0
	50	34.7 b	29.3 a	25.1 a	16.6 a	21.2 a	67	33	0	0
舞風車	0	56.4 a	42.9 a	26.9 a	5.9 a	10.9 a	11	89	0	0
	20	76.1 b	54.8 b	30.6 b	5.2 a	11.0 a	0	100	0	0
	35	86.9 b	62.1 b	34.2 c	4.8 a	10.6 a	0	100	0	0
	50	82.3 b	56.7 b	33.1 c	5.3 a	10.0 a	0	100	0	0

[z] LY-LEDモジュールを一時的に連続点灯させたときのキク茎頂付近における放射照度を示す
[y] 同一品種における同一カラム内の同一英小文字間にはTukeyのHSD検定により5%水準で有意な差がないことを示す（n = 3）
[x] 第1-19図の花房型を示す

‘イエロープーマ’ および‘舞風車’では，各処理区間に有意な差は見られなかった．

花房型は，‘ホワイトリネカー’では，35 および 50 mW･m^{-2} 区において，‘セイローザ’および‘舞風車’では，20，35 および 50 mW･m^{-2} 区において，すべての花房がⅡ型となり，0 mW･m^{-2} 区と比較してⅡ型の割合が増加した（第 1-9 表）．

花色は，すべての品種において，処理区間で目視により差がないようであった．

第 4 側枝長は，‘ホワイトリネカー’（第 1-29 図Ⅰ）では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差は見られなかったが，35 および 50 mW･m^{-2} 区で 6.3～6.5 cm 増加し，有意な差が見られた．‘セイローザ’，‘イエロープーマ’および‘舞風車’の 3 品種（第 1-29 図Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ）では，各処理区間に有意な差は見られなかった．

第 4 側枝着生角度は，‘ホワイトリネカー’，‘セイローザ’および‘イエロープーマ’の 3 品種（第 1-29 図Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ）では，各処理区間に有意な差は見られなかった．‘舞風車’では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，35 mW･m^{-2} 区で 7.7 度増加し，有意な差が見られた．

3 考 察

白熱電球を光源とする電照に対し，キクが示す開花反応は品種によって異なる（岡田，1963）が，「白熱電球で 50 lx（360 mW･m^{-2} 相当）」は，電照抑制栽培のための 1 つの基準（木村，1974；米村，1993）とされている．一方，防蛾に有効な最低照度は 1～2 lx（1.2～3.2 mW･m^{-2} 相当）以上とされ（内田ら，1978；藪，1999），本項で設定した放射照度 5，20，35 および 50 mW･m^{-2} は，防蛾に有効とされる下限値より大きいものの，キクの電照抑制栽培の基準とされる放射照度の 1～14％にすぎない．しかし，質的にみた場合，供試した LY-LED から放射される光は，白熱電球と比較して，単位放射照度当たりの開花抑制作用が強い（石倉ら，2009，2011）．また，量的にみた場合，白熱電球による電照は通常 4～5 時間の暗期中断で行われているのに対して，防蛾用照明では，最大の防蛾効果を得る観点から終夜照明が採用されている（島内ら，2010；八瀬，2004）．このように，黄色光による終夜照明は，キクの開花に対し，質的にも量的にも影響が大きい照明条件と考えられる．

これを踏まえて，本項では，デューティー比 20％に相当し，防蛾に有効とされる明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光（石倉ら，2012b；尹ら，2012）を，夏秋ギク型および秋ギク型の輪ギク，小ギクおよびスプレーギクに照射する場合，開花遅延や切り花形質の低下を起こすことなく適用できる放射照度の範囲を，合計 19 品種を供試して検討した．なお，キクの発蕾を完全に抑制できる照度が品種によって異なる（岡田，1963）ことを考慮して，供試品種は，電照により開花制御が可能であること，または，それぞれ発蕾を抑制できる照度が異なっていると証明された品種であることを基準に選定した．

黄色パルス光の放射照度と輪ギクの開花反応

第 3 節第 1 項では，LY-LED を用い，放射照度を 40 mW･m^{-2} として与えた連続光下では，無処理区（0 mW･m^{-2}）と比較して‘神馬’の発蕾日が 23.6 日遅延することを明らかにした．さらに，同条件で与えた連続光下における定植 93 日後の開花率は 56%に留まり，0 mW･m^{-2} 区の開花率 100%と比較して，開花日が著しく遅延することを確認している．本項においても，放射照度 50 mW･m^{-2} の連続光下では，0 mW･m^{-2} 区と比較して，夏秋ギク型輪ギク‘岩の白扇’（第 1-20 図）の発蕾日が 17.4 日遅延し, 同じ放射照度の連続光下における定植 84 日後の開花率は 56%となり，無処理区の開花率 100%と比較して, 開花日が著しく遅延することが明らかとなった（第 1-4 表）．秋ギク型輪ギクの供試品種においては，連続光の処理区を設けなかったが，これらの品種においても連続光下においては，‘岩の白扇’と同様に開花が遅延すると推察された．

一方, デューティー比 20%の黄色パルス光下では, 0 mW･m^{-2} 区と比較して, 5, 20 および 50 mW･m^{-2} において，‘岩の白扇’の発蕾所要日数に有意な影響を及ぼさなかった．また，0 mW･m^{-2} 区と比較して，秋ギク型輪ギク‘神馬’，‘精興の誠’および‘花秀芳’の 3 品種（第 1-21 図Ⅰ，Ⅱ，Ⅳ）においては，20 mW･m^{-2} において，発蕾所要日数に有意な影響を及ぼさなかった．‘精興黄金’（第 1-21 図Ⅲ）においてのみ，0 および 20 mW･m^{-2} 区間に有意な差がみられたが，その差は 2.2 日であった．到花日数については，0 mW･m^{-2} 区と比較して，‘岩の白扇’（第 1-20 図）で 5 mW･m^{-2}，‘神馬’（第 1-21 図Ⅰ）で 35 mW･m^{-2},‘精興の誠’（第 1-21 図Ⅱ）および‘花秀芳’（第 1-21 図Ⅳ）では 20 mW･m^{-2} において有意な影響を及ぼさなかった．‘精興黄金’（第 1-21 図Ⅲ）においてのみ，0 および 20 mW･m^{-2} 区間に有意な差がみられたが，その差は 5.3 日であった．

川田・船越（1988）は，キクでは花弁の着色期まで日長が開花期に影響を及ぼすことを指摘している．計画的な開花抑制を目的とする通常の電照ギク栽培では，発蕾期以降が限界日長を超える日長となるように電照することはない．一方，黄色光による防蛾効果は，終夜照明下で最大となる（島内ら，2010；八瀬，2004）ことが示唆・指摘されている．従って，防蛾には，発蕾期以降も終夜照明する必要があり，長い日長とならざるをえない．‘岩の白扇’（第 1-20 図）の 20 および 50 mW･m^{-2} 区において，発蕾所要日数では 0 mW･m^{-2} 区との間に有意な差がみられなかったが，到花日数には有意な差がみられた．これらの結果は終夜照明が発蕾期以降も継続されたことにより，花蕾の発達が抑制されたためと推察された．しかしながら，‘神馬’（第 1-21 図Ⅰ）の 35 mW･m^{-2} 区において，発蕾所要日数では 0 mW･m^{-2} 区との間に有意な差が見られたが，到花日数には有意な差が見られなかった. これは, 切り花ギクの有する黄色パルス光に対する感受性が，発蕾期までと，発蕾期から花弁の着色期までとでは異なっており，また，品種によっても異なるためと考えられた．発蕾までの黄色パルス光に対するキクの感受性は，発蕾所要日数 Y_1 と茎頂付近の放射照度 X の関係を示す近似式の傾きの大小から推定できると考えた．秋ギク型輪ギク品種では，近似式の傾きが 0.17 と最も大きい‘精興黄金’（第 1-21 図Ⅲ）が最も敏感で，次いで 0.08 の‘神馬’（第 1-21 図Ⅰ）および 0.07 の‘花秀芳’（第 1-21 図Ⅳ）がほぼ同等でそれに続き，0.05

の‘精興の誠’（第 1-21 図Ⅱ）が最も鈍感であると推察された．ところが，発蕾所要日数と同様に，到花日数 Y_2 と茎頂付近の放射照度 X の関係を示す近似式の傾きから感受性を推定した場合，秋ギク型輪ギク品種では，‘精興黄金’（第 1-21 図Ⅲ）が最も敏感で，次いで‘精興の誠’（第 1-21 図Ⅱ）が続き，‘花秀芳’（第 1-21 図Ⅳ）および‘神馬’（第 1-21 図Ⅰ）がほぼ同等でそれに続き，開花までの感受性が発蕾までのそれと異なる結果となった．このことから，黄色パルス光の放射照度に対する開花反応は，発蕾までの感受性だけでなく，発蕾から開花までの感受性によっても大きく影響されることが示唆された．夏秋ギク型および秋ギク型輪ギク品種の切り花形質のうち，切り花長は‘精興の誠’および‘精興黄金’を除き，また，切り花重，切り花節数，花首長，舌状花数および管状花数ではすべての品種において，0 および 20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差はないことが示された（第 1-4 および 1-5 表）．‘精興の誠’および‘精興黄金’では，切り花長において両区間に有意な差がみられたが，その差は 6～7 cm であった．

黄色パルス光の放射照度と小ギクの開花反応

小ギクにおいても，連続光の処理区を設けなかったが，連続光下においては，前述の‘岩の白扇’と同様に開花が遅延すると推察された．デューティー比 20%の黄色パルス光下における夏秋ギク型小ギク品種の発蕾所要日数は，供試した 3 品種（第 1-22 図）で，茎頂付近の放射照度 0 および 20 mW･m^{-2} 区間に有意な差がなかった．到花日数は，‘花秀美’（第 1-22 図Ⅲ）においてのみ，0 および 20 mW･m^{-2} 区間に有意な差がみられたが，その差は 5.0 日であった．一方，秋ギク型小ギク品種の発蕾所要日数および到花日数は，‘沖の乙女’を除く 3 品種（第 1-24 図Ⅰ，Ⅱ，Ⅳ）では，夏秋ギク型小ギク品種と同様に，茎頂付近の放射照度が 0 および 20 mW･m^{-2} 区間に有意な差はなかった．‘沖の乙女’（第 1-24 図Ⅲ）のみ，0 および 20 mW･m^{-2} 区間に有意な差がみられ，その差は発蕾所要日数で 1.8 日，到花日数で 3.0 日であった．

‘白鳥’（第 1-22 図Ⅰ）の 35 および 50 mW･m^{-2} 区，‘花秀美’（第 1-22 図Ⅲ）の 20 mW･m^{-2} 区および‘沖ピンク’（第 1-24 図Ⅳ）の 35 mW･m^{-2} 区において，発蕾所要日数では 0 mW･m^{-2} 区との間に有意な差がみられなかったが，到花日数には有意な差がみられた．これらの結果は，前述の輪ギクの場合と同様に，終夜照明が発蕾期以降も継続されたことにより，花蕾の発達が抑制されたためと推察された．

発蕾までの黄色パルス光に対するキクの感受性は，前述の輪ギクの場合と同様に，発蕾所要日数 Y_1 と茎頂付近の放射照度 X の関係を示す近似式の傾きの大小から推定できると考えた．夏秋ギク型小ギク品種では，近似式の傾きが 0.17 と最も大きい‘花秀美’（第 1-22 図Ⅲ）が最も敏感で，次いで 0.08 の‘白鳥’（第 1-22 図Ⅰ）および 0.07 の‘やよい’（第 1-22 図Ⅱ）がほぼ同等でそれに続くと推察された．同様に，秋ギク型小ギク品種では，0.15 の‘沖の乙女’（第 1-24 図Ⅲ）が最も敏感で，次いで 0.14 の‘お吉’（第 1-24 図Ⅱ）となり，0.07 の‘沖ピンク’（第 1-24 図Ⅳ）および‘金秀’（第 1-24 図Ⅰ）がほぼ同等でそれに続くと推察された．ところが，発蕾所要日数

と同様に，到花日数 Y_2 と茎頂付近の放射照度 X の関係を示す近似式の傾きから感受性を推定した場合，夏秋ギク型小ギク品種では，‘やよい’（第 1-22 図Ⅱ）が最も敏感で，次いで‘白鳥’（第 1-22 図Ⅰ）および‘花秀美’（第 1-22 図Ⅲ）がほぼ同等でそれに続いた．秋ギク型小ギク品種では，‘お吉’（第 1-24 図Ⅱ）が最も敏感で，次いで‘沖の乙女’（第 1-24 図Ⅲ）となり，‘沖ピンク’（第 1-24 図Ⅳ）および‘金秀’（第 1-24 図Ⅰ）がほぼ同等でそれに続き，開花までの感受性が発蕾までのそれと異なる結果となった．このことから，黄色パルス光の放射照度に対する小ギクの開花反応は，前述の輪ギクと同様に，発蕾までの感受性だけでなく，発蕾から開花までの感受性によっても大きく影響されることが示唆された．

夏秋ギク型および秋ギク型小ギク品種の切り花形質のうち，切り花長は‘花秀美’を除き，また，切り花重，主茎節数および総花蕾数ではすべての品種において，0 および 20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差はないことが示された（第 1-6 および 1-7 表）．唯一，‘花秀美’では，切り花長において両区間に有意な差がみられた．

井水・本林（2001）は，長日条件下で小ギクの花房型が乱れることを指摘している．本項においても，夏秋ギク型小ギク品種では，特に‘やよい’において，放射照度が大きいほど，Ⅳ型で示される花房型の割合が増加し，切り花形質の低下傾向がみられた（第 1-6 表）．一方，秋ギク型小ギク品種の‘金秀’，‘お吉’および‘沖ピンク’では，放射照度が大きいほど，Ⅰ型の割合が減少し，Ⅱ型の割合が増加する傾向がみられたが，0 mW･m^{-2} 区と 20 mW･m^{-2} 区の間には，大きな差はみられなかった（第 1-7 表）．このため，放射照度は最大でも 20 mW･m^{-2} に抑える必要があると考えられた．甲斐ら（1995）は，スプレーギクの切り花品質を評価するうえで，花柄長，花柄と主茎の成す角度である花柄角が重要な特徴量であることを報告している．これに基づき，道園ら（2012）は，一次側枝数，第 4 側枝長および第 4 側枝着生角度を切り花品質の評価指標として用いている．本研究でもこれらを評価指標として用いた．一次側枝数は，‘花秀美’を除き，また，第 4 側枝長および第 4 側枝着生角度は，いずれの夏秋ギク型および秋ギク型小ギク品種においても，0 および 20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差はなかった（第 1-6 および 1-7 表，第 1-23 および 1-25 図）．唯一，‘花秀美’では一次側枝数において両区間に有意な差がみられたが，総花蕾数においては有意な差がみられなかった．このことから，一次側枝数の 0.9 本の増加は，切り花形質に影響を及ぼさないと考えられた．

黄色パルス光の放射照度とスプレーギクの開花反応

スプレーギクにおいても，連続光の処理区を設けなかったが，連続光下においては，前述の‘岩の白扇’と同様に開花が遅延すると推察された．デューティー比 20%の黄色パルス光下における夏秋ギク型スプレーギク品種の発蕾所要日数は，供試した 3 品種（第 1-26 図）で，茎頂付近の放射照度 0 および 35 mW･m^{-2} 区間に有意な差がなかった．到花日数は，‘ロアール’（第 1-26 図Ⅲ）においてのみ，0 および 35 mW･m^{-2} 区間に有意な差がみられたが，その差は 6.7 日であった．一

方，秋ギク型スプレーギク品種の発蕾所要日数は，‘ホワイトリネカー’（第 1-28 図Ⅰ）および‘イエロープーマ’（第 1-28 図Ⅲ）では，夏秋ギク型小ギク品種と同様に，茎頂付近の放射照度が 0 および 20 mW･m^{-2} 区間に有意な差はなかった．‘セイローザ’（第 1-28 図Ⅱ）および‘舞風車’（第 1-28 図Ⅳ）では，0 および 20 mW･m^{-2} 区間に有意な差がみられ，その差は 6.2～7.3 日であった．到花日数は，‘ホワイトリネカー’（第 1-28 図Ⅰ）のみ，茎頂付近の放射照度が 0 および 20 mW･m^{-2} 区間に有意な差はなかった．‘セイローザ’，‘イエロープーマ’および‘舞風車’の 3 品種（第 1-28 図Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ）では，0 および 20 mW･m^{-2} 区間に有意な差がみられ，その差は 4.2～10.0 日であった．

‘イエロープーマ’（第 1-28 図Ⅲ）の 20 mW･m^{-2} 区において，発蕾所要日数では 0 mW･m^{-2} 区との間に有意な差がみられなかったが，到花日数には有意な差がみられた．これらの結果は，前述の輪ギクおよび小ギクの場合と同様に，終夜照明が発蕾期以降も継続されたことにより，花蕾の発達が抑制されたためと推察された．

発蕾までの黄色パルス光に対するキクの感受性は，前述の輪ギクおよび小ギクの場合と同様に，発蕾所要日数 Y_1 と茎頂付近の放射照度 X の関係を示す近似式の傾きの大小から推定できると考えた．しかし，夏秋ギク型スプレーギク品種では，供試した 3 品種の発蕾所要日数に関する近似式の傾きが 0.04～0.06 の範囲にあり，ほぼ同等と推察された．同様に，秋ギク型スプレーギク品種では，0.37 の‘セイローザ’（第 1-28 図Ⅱ）が最も敏感で，次いで 0.22 の‘ホワイトリネカー’（第 1-28 図Ⅰ）となり，0.18 の‘舞風車’（第 1-28 図Ⅳ）が続き，0.03 の‘イエロープーマ’（第 1-28 図Ⅲ）が最も鈍感であると推察された．ところが，発蕾所要日数と同様に，到花日数 Y_2 と茎頂付近の放射照度 X の関係を示す近似式の傾きから感受性を推定した場合，夏秋ギク型スプレーギク品種では，‘セイスーザ’（第 1-28 図Ⅰ）が最も敏感で，次いで‘ロアール’（第 1-28 図Ⅲ）が続き，‘セイロカル’（第 1-28 図Ⅱ）が最も鈍感であると推察された．秋ギク型小ギク品種では，‘セイローザ’（第 1-28 図Ⅱ）が最も敏感で，次いで‘舞風車’（第 1-28 図Ⅲ）および‘ホワイトリネカー’（第 1-28 図Ⅰ）がほぼ同等で続き，‘イエロープーマ’（第 1-28 図Ⅳ）が最も鈍感であると推察され，開花までの感受性が発蕾までのそれと多少異なる結果となった．このことから，黄色パルス光の放射照度に対するスプレーギクの開花反応は，前述の輪ギクおよび小ギクと同様に，発蕾までの感受性だけでなく，発蕾から開花までの感受性によっても影響されることが示唆された．

夏秋ギク型および秋ギク型スプレーギク品種の切り花形質のうち，切り花長は‘ロアール’，‘セイローザ’および‘舞風車’において，切り花重は‘ロアール’および舞風車’において，主茎節数は‘セイローザ’および‘舞風車’において，総花蕾数は‘ロアール’において，0 および 20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差が見られ，その差は，切り花長で 10.3～17.6 cm，切り花重で 24.7 g，主茎節数で 3.7～4.5 節，総花蕾数で 5.9 個であった（第 1-8 および 1-9 表）．

井水・本林（2001）が小ギクにおいて指摘している長日条件下での花房型の乱れは，本項での

スプレーギクにおいても発生した．秋ギク型スプレーギク品種‘ホワイトリネカー’，‘セイローザ’および‘舞風車’において，黄色パルス光の放射照度が 20，35 および 50 mW･m^{-2} の場合，Ⅱ型で示される花房型の割合が増加し，切り花形質の低下傾向が見られた（第 1-9 表）．しかしながら，夏秋ギク型スプレーギク品種‘セイロカル’においては，黄色パルス光の放射照度が高いほど，Ⅰ型で示される花房型の割合が増加し，切り花形質の向上傾向が見られ（第 1-8 表），秋ギク型スプレーギクの結果や，小ギクに関する知見（井水・本林，2001）と異なった．黄色パルス光下において，このような花房型の改善効果が見られた理由については，今後，詳細に検討する必要がある．スプレーギクについても，前述の小ギクと同様に，一次側枝数，第 4 側枝長および第 4 側枝着生角度を切り花品質の評価指標として用いていた．一次側枝数については，すべての品種において，0 および 20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差はないことが示された（第 1-8 および 1-9 表）．また，第 4 側枝長および第 4 側枝着生角度は，‘ロアール’を除くすべての夏秋ギク型および秋ギク型スプレーギク品種において，0 および 20 mW･m^{-2} 区との間に有意な差はなかった（第 1-27 および 1-29 図）．唯一，‘ロアール’では第 4 側枝着生角度および総花蕾数において両区間に有意な差がみられたことから，黄色パルス光を利用する場合，特に注意が必要な品種の 1 つと考えられた．

黄色パルス光下で共通する輪ギク，小ギクおよびスプレーギクの開花反応

開発中の防蛾照明技術の導入が想定される生産者圃場における露地ギク季咲き栽培では，夏秋ギク型，および秋ギク型輪ギク品種を問わず，同一作型内の開花日で 1 週間程度，切り花長で十数 cm 程度の差が発生しうることをこれまでに確認している．従って，照射照度 20 mW･m^{-2} 区において見られた到花日数で 5 日前後，切り花長で 10 cm 前後の増加は，厳密な開花制御を必要とする物日出荷などでは考慮すべき点も残されているが，営利栽培上の問題とはならない範囲にあると考えられた．しかしながら，20 mW･m^{-2} 区において，到花日数で 8.1～10 日，切り花長で 17.6～19.7 cm の増加が見られた秋ギク型スプレーギク品種の‘セイローザ’および‘舞風車’については，黄色パルス光の照射にあたって，特に注意が必要な品種であると考えられた．また，これらの結果は，プランター栽培，加温栽培，あるいは無摘心栽培により得られたものである．このため，より普遍的な結論を導き出すためには，地床栽培，なりゆきの温度管理下の季咲き栽培，摘心栽培など，実際の栽培に即した条件下においても再検証する必要があると考えている．

キクの花色の発現に関与する主な色素は，カロチノイドとアントシアニンの 2 種類であり（服部，1991），バラやイチゴではアントシアニンの発現に紫外光が強く関与している（赤松ら，2004；東尾ら，2009）とされている．黄色光とキクの花色発現に関する知見は見あたらないが，本研究で設定したいずれの放射照度においても，花色への影響は視認できなかった．これは，本研究で用いた LY-LED が 400 nm 以下の紫外光を放射していないためであろう．

本実験により，LED の有する優れた応答速度に着目した黄色パルス光を用いることで，連続光

では著しく開花が遅延してしまう放射照度であっても営利生産へ十分に適用でき，前項では未解明であった放射照度の上限値が明らかとなった．到花日数および切り花形質に有意な影響を及ぼすことなく適用できる放射照度の上限値は，‘岩の白扇’で 5～20 mW･m^{-2}，‘神馬’で 20～35 mW･m^{-2}，‘精興の誠’で 0～20 mW･m^{-2}，‘精興黄金’で 0～20 mW･m^{-2}，‘花秀芳’で 20～35 mW･m^{-2}，‘白鳥’で 20～35 mW･m^{-2}，‘やよい’で 20～35 mW･m^{-2}，‘花秀美’で 0～20 mW･m^{-2}，‘金秀’で 20～35 mW･m^{-2}，‘お吉’で 20～35 mW･m^{-2}，‘沖の乙女’で 0～20 mW･m^{-2}，‘沖ピンク’で 20～35 mW･m^{-2}，‘セイスーザ’で 35～50 mW･m^{-2}，‘セイロカル’で 35～50 mW･m^{-2}，‘ロアール’で 0～20 mW･m^{-2}，‘ホワイトリネカー’で 20～35 mW･m^{-2}，‘セイローザ’で 0～20 mW･m^{-2}，‘イエロープーマ’で 0～20 mW･m^{-2}，‘舞風車’では 0～20 mW･m^{-2} の範囲に存在すると考えられた．圃場内に一定程度の放射照度の差があっても，開花遅延させることなく適用できることは，防蛾用の LED 光源装置の実用化にあたって，配光性などの諸性能を決定する上で有益な知見であると考えている．加えて，1 つの LED モジュール（光源）の出力を一定程度高めた照明設計が可能となる．その結果，連続光を適用する場合と比較して，単位面積当たりに必要となる光源数を少なく設定できるので，導入コストの低減と，設置作業の軽減に大きく貢献できるものと考えている．

本実験は，キクの茎頂付近が所定の放射照度となるよう 1 週間ごとに光源の高さを調整して，開花遅延させることなく適用できる上限値を求めた．実際栽培では，省力化の観点から，光源を手動で動かすことで放射照度を調整しなくても利用できることが望ましい．このため，固定光源を前提として，技術開発を進める必要がある．LED には調光が容易であるという特性があるが，本研究で得られた知見に基づいて適切に照明設計することで，放射照度をキクの成長に合わせて調整することなく利用できる防蛾用の LED 光源装置の開発は十分に可能であると考えている．例えば，計算では，現有の電照用防水ソケットケーブル（E26 対応）を用いて，地面からの高さと光源同士の間隔を一定とする固定光源として圃場導入した場合，キクの草丈に関わらず茎頂付近で下限 1 mW･m^{-2}，上限 20 mW･m^{-2} の範囲の放射照度を確保できる見込みは高い．今後，そのような LED 光源装置を試作して現地実験を行い，実際の放射照度の分布や開花，切り花形質に及ぼす影響を詳細に検証する必要があろう．

以上のことから，第 1 章第 2 節で明らかにしたヤガ類が照射光を点滅光として視認可能な放射照度と比較して，短日植物である切り花ギクへ適用できる放射照度の上限値は小さいことから，実際の栽培での防蛾照明技術における放射照度の範囲は，キクに適用できる上限値以下に設定すればよいことが示された．また，本技術の適用にあたっては，品種の選択に注意を払う必要があることが示唆された．今後は，照明に対する感受性が敏感な品種を中心に，より多くの品種を供試するとともに，作型の影響にも考慮しつつ，実用的に適用可能な照射方法を開発する必要がある．

第 3 項　黄色パルス光の点灯方式とキクの開花反応特性

同期・非同期させた黄色パルス光に対する適用性

照射光を特定のデューティー比でパルス化する場合，種々の半導体を用いて設計・製作された電子回路を活用する必要がある．一般的な半導体には，最大 5%程度の製品誤差があることが知られている．小型である半導体の特徴を活かし，LED ランプの筐体内にパルス化のための電子回路を組み込むことで，外付けの電子回路を利用する場合と比較して，デザイン性や取り回し性能に優れる製品化が実現できる．しかし，LED ランプの点滅のタイミングは，電子回路に内蔵された半導体の製品誤差の影響を受けるので，複数の LED ランプを特別な対策を講じることなく点灯させた場合，時間的に完全に連関した点滅とはならない．本項では，複数の LED ランプを，時間的に連関させて点灯する場合を「同期」，連関させない場合を「非同期」と定義する．

一方，前項までは，同期点灯を前提として検討しており，非同期点灯させた黄色パルス光の照射が切り花ギクへ及ぼす影響については未解明であった．そこで，LED ランプの製品化に向けた基礎的知見を得るために，キクの開花特性の観点から，同期，あるは非同期点灯させた黄色パルス光の照射が，切り花ギクの発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響を調査した．

PWM 周波数への適用性

「防蛾と開花抑制の 2 つを単一の光源で実現する」という観点から，LY-LED を光源として用い，第 1 節第 3 項において，秋ギクを電照抑制栽培する場合に，白熱電球と同等の開花抑制作用を得るために必要となる放射照度を明らかにした．さらに，LY-LED を光源として用い，第 3 節第 2 項において，ヤガ類成虫の飛翔行動抑制に効果的とされる明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光（尹ら，2010；2011；2012）について，合計 19 品種を供試し，切り花ギクに有意な影響を及ぼすことなく適用できる放射照度の範囲を特定した．その結果，白熱電球と同等の開花抑制作用を得るために必要となる放射照度は，切り花ギクに有意な影響を及ぼすことなく適用できる放射照度と比較して，最大で数十倍大きいことが示唆された．

ところで，一般照明用の白色 LED 光源の中には，PWM 制御による調光機能を有する上位機種が，すでに市販されており，当該機能によって，効率的，かつ容易な調光（明るさの調節）が可能となっている．キク栽培においても，同様な調光技術を用いることで，必要に応じて放射照度の調節が可能となると考えられる．しかし，LY-LED を用いた PWM 点灯下のキクの開花反応については未解明である．

そこで，キクの成長に応じた効率的な調光管理を実現するとともに，キクの防蛾と開花抑制の 2 つを単一の光源で実現する上で重要となる基礎的知見を得るため，LY-LED を用いた PWM 点灯下での放射照度が秋ギク‘神馬’の発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響を検討した．

1　材料および方法

同期・非同期させた黄色パルス光に対する適用性

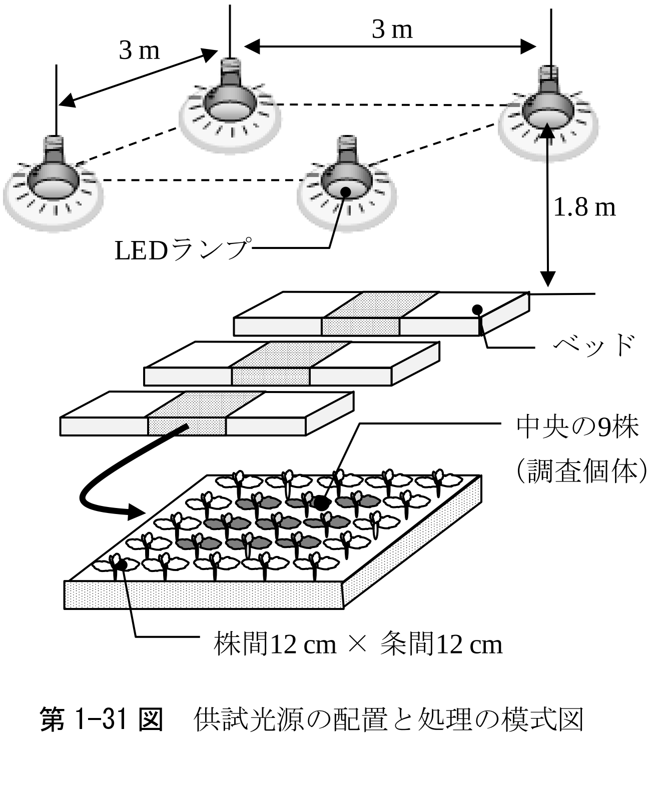
秋ギク‘神馬’を 2010 年 7 月 12 日に挿し芽し，7 月 30 日に株間 12 cm×条間 12 cm の 5 列×5 条で，沖積土：ピートモスを容量比で 3：1 の割合に混合した培地で客土した幅 1 m × 耕土深 30 cm のベッドへ定植して無摘心栽培した．実験期間中は，なりゆきの温度管理とした．LY-LED（第 1-6 図）と同様な相対分光放射照度を有する黄色蛍光 LED を 6 個実装した LED ランプ（第 1-30 図）を試作し，光源として供試した．当該 LED ランプは，筐体内に専用の電子回路を内蔵しており, 既存の防水ソケットケーブル（口金 E26）に装填し通電することで明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を放射できる．また，当該 LED ランプは，1 灯を高さ 1.8 m に吊り下げて点灯すれば，直下から半径 3 m 以内の地面において，防蛾に有効とされる照度の下限値である 1～2 lx（内田ら，1978 ; 藪，1999，1.2～3.2 mW･m^{-2} 相当）を上回る放射照度 2.6～9.1 mW･m^{-2} を確保できる配光性能を有する．また，第 3 節第 2 項で得られた「主要な秋ギク型輪ギクである‘神馬’に有意な影響を及ぼすことなく適用できる放射照度の上限値は 20～35 mW･m^{-2} の範囲に存在する」という知見に基づき，LED ランプ直下の地面からの高さが 1 m の位置においても，放射照度が 35 mW･m^{-2} を大きく超えないように製作した．さらに，複数個を設置する場合は，地面からの設置高が 1.8 m で，ランプ間隔を 6 m とすることで，前述の防蛾有効照度の下限値を確保できる．本実験では，設置基準と比較して，より厳しい条件下での検討を意図して，ベッドの地表面からの高さが約 1.8 m の位置に 3 m の間隔とし，定植した植物体を取り囲むように 1 区当たり 4 個配置した（第 1-31 図）．4 個の LED ランプの点滅を時間的に連関させた同期区と，連関させない非同期区を設けた．また，定植日以降を自然日長下で管理する無処理区を設けた．同期および非同期区では, 定植日から 10 月 24 日までの 86 日間, 毎日 17:00～7:00 まで終夜照明した．その他の条件および調査方法は，第 3 節第 2 項に準じた．

PWM 周波数への適用性

秋ギク‘神馬’を 2012 年 9 月 15 日に挿し芽し，10 月 1 日に株間 7.5 cm×条間 45 cm の 2 条で地床へ定植して，日最低気温が 15℃を下回らないように管理したプラスチックハウス内で無摘心栽培した．供試光源には，第 1 節第 2 項と同じ LY-LED を実装したモジュールを，短波長カットフィルタを装着しない状態で用いた（第 1-6 図）．処理区には，デューティー比を 50%とし，専用の周波数制御装置を用いてパルス幅変調周波数（PWM 周波数）を 1 kHz として照射する LY-LED･1 kHz 区と，通常の連続光を照射する LY-LED･連続区を設けた．対照として，白熱電球（K-RD100V75W，パナソニック社製）を光源とする白熱電球区を設けた．定植日から 11 月 10 日までの 40 日間，16:30～7:30 に供試光源による終夜照明を毎日行い，その後は自然日長下で管理した．その他の条件および調査方法は，第 1 節第 3 項に準じた．

第 1-30 図　試作した明期 20 ms／暗期 80　ms の時間構造を有する黄色パルス光を放射できる LED ランプ

LED ランプの筐体内に専用の電子回路を内蔵し，通電することで所定の時間構造を有する黄色パルス光を放射できる



第 1-31 図　供試光源の配置と処理の模式図

2　結　果

同期・非同期させた黄色パルス光に対する適用性

同期区および非同期区における調査個体上の放射照度は，畝面からの高さが 1 m の位置で 9～16 mW･m^{-2} であることを確認した（データ省略）.

定植日からの発蕾所要日数は，無処理区と比較して，同期区で 3 日，非同期区で 4 日増加し，有意な差が見られた（第 1-10 表）.

定植日からの到花日数は，無処理区と比較して，同期区で 2 日，非同期区で 3 日増加し，有意な差が見られた（第 1-10 表）.

切り花長は，無処理区および同期区と比較して，非同期区で 6～9 cm 増加し，有意な差が見られた（第 1-10 表）.

切り花重および切り花節数は，各処理区間に有意な差がみられなかった（第 1-10 表）.

花首長は，無処理区と同期区および非同期区間に有意な差は見られなかった（第 1-10 表）.

舌状花数は，無処理区と比較して，同期区で 30 個，非同期区では 34 個減少し，有意な差が見られた（第 1-10 表）.

管状花数は，無処理区と比較して，同期区で 19 個，非同期区では 27 個増加し，有意な差が見られた（第 1-10 表）.

花弁の展開異常は，いずれの区でも見られなかった（第 1-10 表）.

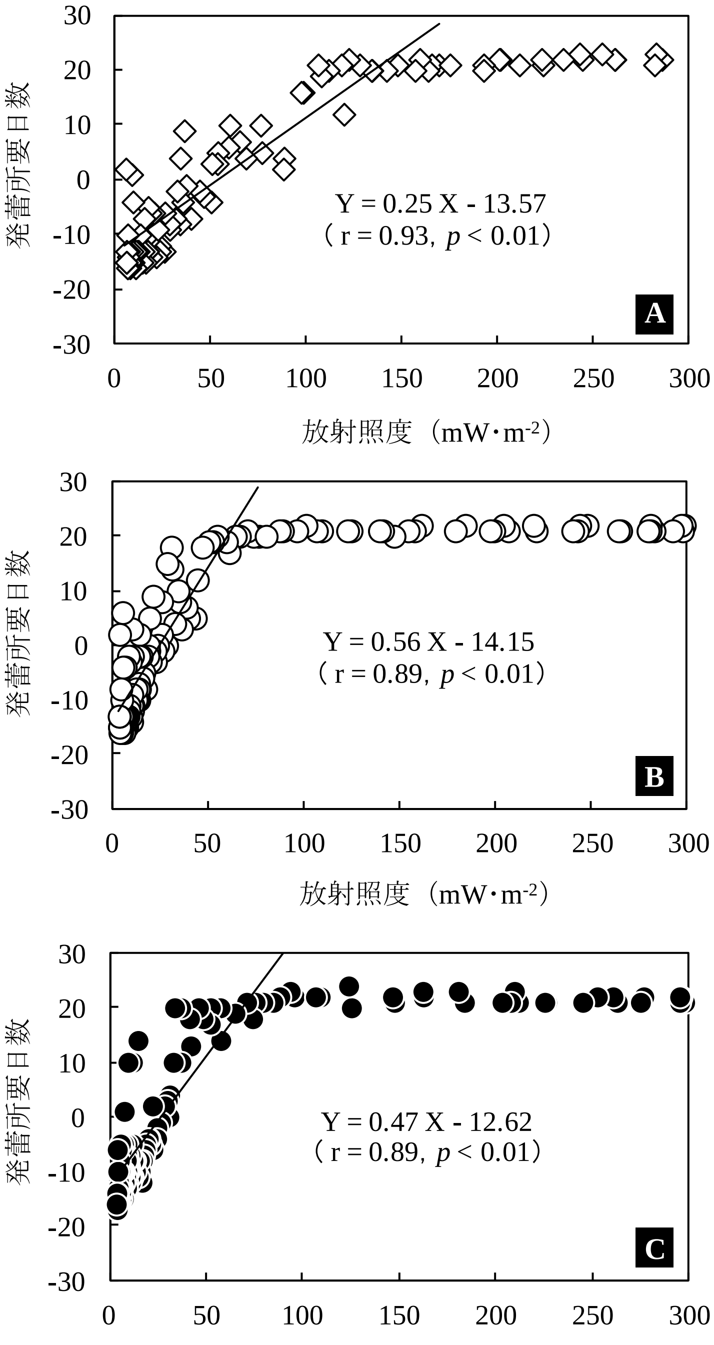
PWM 周波数への適用性

終夜照明を終了した 11 月 10 日からの発蕾所要日数は，すべての処理区において，ある放射照度域では放射照度が大きいほど増加し，その範囲を超えるとほぼ一定の 22 日となった（第 1-32 図）. 放射照度が大きいほど発蕾所要日数が増加する放射照度域において，放射照度と発蕾所要日数との関係を定量することを意図して回帰直線を推定した. 白熱電球区の発蕾所要日数 : Y（日）と畝面における放射照度 : X（mW･m^{-2}）との関係は一次回帰式で近似でき，Y = 22 日となる X の下限値は 143 mW･m^{-2} であった（第 1-32 図 A）. 同様に，LY-LED･連続光区では，放射照度が 4～64 mW m^{-2} において，一次回帰式で近似でき，Y = 22 日となる X の下限値は 64 mW･m^{-2} であった（第 1-32 図 B）. 同様に，LY-LED･1 kHz 区では，放射照度が 3～73 mW･m^{-2} において，一次回帰式で近似でき，Y = 22 日となる X の下限値は 73 mW m^{-2} であった（第 1-32 図 C）. なお，これら 3 つの一次回帰式は，それぞれの相関係数 r が最大となることを前提に算出した.

第 1-10 表　同期あるいは非同期させたLEDランプによる黄色パルス光が秋ギク‘神馬’の発蕾所要日数，到花日数および切り花形質に及ぼす影響

点灯方式	発蕾所要日数[z]	到花日数[y]	切り花 長（cm）	切り花 重（g）	切り花 節数（節）	花首長（cm）	舌状花数（個）	管状花数（個）	花弁の展開異常
無処理	53 a[x]	80 a	115 a	129 a	73 a	2.8 ab	249 b	90 a	無
同　期	56 b	82 b	118 a	129 a	75 a	2.5 a	219 a	109 b	無
非同期	57 c	83 c	124 b	130 a	76 a	2.9 b	215 a	117 b	無

[z] 定植から発蕾までの日数を示す
[y] 定植から開花までの日数を示す
[x] 表中の同一カラム内の同一英小文字間にはTukeyのHSD検定により5%水準で有意差なし（n=3）



第 1-32 図 LY-LED を用いたデューティー比 50%の PWM 周波数 1 kHz による終夜照明時の放射照度が秋ギク‘神馬’の発蕾所要日数に及ぼす影響

A 白熱電球区，B LY-LED･連続光区，C LY-LED･1 kHz 区

発蕾所要日数は夜間照明終了日の 11 月 10 日から発蕾日までの日数を示し，11 月 10 日より前に発蕾した場合はマイナス値で示す

3　考　察

同期・非同期させた黄色パルス光に対する適用性

パルス化のための電子回路を内蔵した LED ランプを同期点灯させるためには，電力供給用のケーブルとは別に，同期のための信号ケーブル，あるいは同期のための無線信号の受信機などが必要となり，製品としてのイニシャルコストは上昇する．このため，同期と非同期とがキクに及ぼす影響が同じであれば，非同期の選択が適切であると考えられる．

秋ギク型輪ギク‘神馬’については，第 3 節第 2 項において，到花日数および切り花形質に有意な影響を及ぼすことなく適用できる放射照度の上限値は，放射照度 20～35 mW･m^{-2} の範囲に存在することが示唆された．しかし，本項の結果は，それとは異なった．畝面からの高さが 1 m の位置の放射照度が 9～16 mW･m^{-2} であっても，同期区および非同期区において，発蕾所要日数で 3～4 日，到花日数で 2～3 日遅延し，無処理区との間に有意な差が見られた．第 3 節第 2 項および本項で供試した LY-LED モジュールは，相対分光放射照度が同じであったが，LY-LED モジュール個数は第 3 節第 2 項で 1 個，本項では 4 個であった．キクは，上位葉 7 枚程度で日長に感応する（船越，1989）とされている．このため，供試植物体の上方の 1 点からの照射であった第 3 節第 2 項と比較して，供試植物体の周囲を取り囲むように四方から照射した本項が，日長感応部位とされている上位葉 7 枚が受けた受光量の合計が大きかった可能性があり，このことが本項の同期区および非同期区において有意な影響が現れた原因の 1 つと考えられた．

しかしながら，同期区および非同期区との間において見られた発蕾所要日数および到花日数での 1 日，切り花長での 6 cm の差は，許容範囲であり，厳密な開花制御を必要とする物日出荷などでは考慮すべき点も残されているが，営利栽培上の問題はないと考えられた．

以上のように，同期と非同期とがキクに及ぼす影響に大きな違いはないことが明らかとなり，イニシャルコスト低減の観点から，非同期の選択が適切であることが示唆された．

PWM 周波数への適用性

石倉ら（2012a）は，放射照度 20 mW･m^{-2} で照射したデューティー比 50%の黄色パルス光について，PWM 周波数が 1～100 kHz の範囲であれば，秋ギク‘神馬’の発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響は，同じ放射照度で照射した連続光と同じであることを確認している．しかし，放射照度 20 mW･m^{-2} では，白熱電球と同等の開花抑制作用が得られなかったことから，本項では，改めて 20 mW･m^{-2} より高放射照度域における PWM 点灯下におけるキクの開花への影響を検討するとともに，白熱電球と同等の開花抑制作用を得るために必要となる放射照度を検討した．その結果，終夜照明を前提とする秋ギク‘神馬’の電照抑制栽培において，十分な発蕾抑制効果が得られる放射照度の下限値は，LY-LED･連続光区が概ね 60 mW m^{-2}, LY-LED･1 kHz 区が概ね 70 mW･m^{-2} であることが明らかとなった．これにより，連続光による終夜照明と同様に，デューティー比

50%の PWM 周波数 1 kHz による終夜照明は，一定以上の放射照度を確保することで，電照抑制栽培へ適用可能であることが示され，キクの成長に合わせた調光管理実現の可能性が示唆された．

一般照明用の白色 LED 光源の中には，効率的，かつ容易な調光技術として PWM 制御による調光機能が搭載されている上位機種が，すでに市販されていることは前述したとおりである．市販されているすべての機種について調査したわけではないが，デューティー比が 50%で PWM 周波数が 1 kHz に設定されている機種が少なからず存在している. 本項において, デューティー比 50%の PWM 周波数 1 kHz による調光技術がキク栽培へ適用できることが示されたことで，開発技術を具現化する LED ランプの製品化にあたっては，先行する一般照明用の白色 LED 光源で採用されている各種部品および技術の共通化や量産効果により,「適正な価格の商品」を利用者に提供できる可能性が高まったと考えている．なお，LY-LED･連続光区と LY-LED･1 kHz 区での下限値に，約 10 mW･m^{-2} の差がみられた原因については，誤差とも考えられるが，今後，詳細に検討する必要がある．

第 2 章　切り花ギク生産における防蛾照明技術の実際

第 1 節　屋外での寄生虫数の低減効果

第 2 章第 1 節では，これまでに第 1 章第 2 節での室内実験で得られた知見に基づき，デューティー比が 20%である明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を照射し, 屋外におけるオオタバコガの寄生虫数を調査した.

1　材料および方法

秋ギク型小ギク‘白馬’を 2009 年 8 月 24 日に容量 1242 liter（D 460 cm×W 90 cm ×H 30 cm）のドレインベッドへ定植し，兵庫県立農林水産技術総合センター淡路農業技術センター内の屋外グランドに設置して，なりゆきの温度下で無摘心栽培した．培地は，ピートモス：パーライト：マサ土：赤玉土を 65：11：16：8（V/V）で混合して作成した．光源には，短波長カットフィルタを装着した LY-LED モジュール（第 1-6 図）を用いた．無処理（0 mW･m^{-2}）区，パルス光区および連続光区の 3 区を設け，各区間に 25 m の距離を確保して，照明が干渉しないようにした．パルス光区では，デューティー比が 20%である明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を採用した. パルス光区および連続光区では, 1 区当たり 4 個の LY-LED モジュールを用い，LY-LED モジュール点灯時の畝面上 1 m 付近における放射照度を 20 mW･m^{-2} とした．パルス光区および連続光区では，定植日から 10 月 30 日までの 67 日間，毎日 17:00～7:00 まで終夜照明し，9 月 16 日～10 月 30 日の間，約 7 日ごとにヤガ類幼虫の寄生虫数を調査した．なお，照明による害虫防除効果を明確に調べるため，化学合成農薬は使用せず管理した.

2　結　果

オオタバコガ幼虫の寄生虫数は，10 月上中旬に寄生のピークが見られ，無処理区の合計は 12 頭となった（第 2-1 表）. パルス光および連続光区では，一部でわずかにオオタバコガ幼虫の寄生が見られたものの，無処理区と比較して少なく推移した.

ハスモンヨトウ幼虫の寄生虫数は，無処理区で 1 頭，パルス光区で 1 頭，連続光区では 0 頭であった（第 2-2 表）.

3　考　察

パルス光区におけるオオタバコガ幼虫の寄生虫数は，無処理区と比較して，調査期間を通じて少なく推移し，合計で無処理区の 12 分の 1 である 1 頭であった．このため，オオタバコガの防除については，屋外における本技術の有効性を示すことができた．しかしながら，ハスモンヨトウについては，調査期間中の発生が少なかったため，防除効果は判然としなかった．今後は，ヤガ類発生の年次変動を考慮して，複数年にわたった調査を行うことで，開発技術の安定性および有

第 2-1 表　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光による終夜照明がオオタバコガ幼虫の寄生虫数に及ぼす影響

照明方法	調査日								合計
	9/16	9/18	9/25	10/2	10/9	10/16	10/23	10/30	(頭)
無 処 理	0	0	2	2	3	3	1	1	12
パルス光	0	0	0	0	0	0	1	0	1
連 続 光	0	0	1	0	0	0	0	0	1

第 2-2 表　明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光による終夜照明がハスモンヨトウ幼虫の寄生虫数に及ぼす影響

照明方法	調査日								合計
	9/16	9/18	9/25	10/2	10/9	10/16	10/23	10/30	(頭)
無 処 理	0	0	1	0	0	0	0	0	1
パルス光	0	0	1	0	0	0	0	0	1
連 続 光	0	0	0	0	0	0	0	0	0

効性を検討する必要がある.

第 2 節　現地実証

第 2 章第 2 節では，これまでに第 1 章で得られた知見に基づき，試作した切り花ギク用の LED ランプ（第 1-30 図）を，広島県北部の露地ギク圃場において設置・点灯させ，防蛾効果と開花への影響の両面から，開発技術の実用性を検証した.

第 1 項　ヤガ類の被害防止効果と誘引虫数の低減効果

農業技術指導所（旧：農業改良普及所）や地元の JA などから聞き取りを行い，対象害虫としたオオタバコガやハスモンヨトウ幼虫による食害発生が，例年多く見られる露地ギク圃場 2 箇所を選定し，試作した LED ランプ（第 1-30 図）による被害防止効果と，オオタバコガおよびハスモンヨトウの性フェロモントラップを用いて誘引虫数の低減効果を調査した.

1　材料および方法

同期点灯による被害防止効果と誘引虫数の低減効果

実験は，秋ギク型輪ギク‘精の波’を 2010 年 5 月 31 日に株間 10 cm×条間 45 cm の 2 条で定植し，3 本仕立てで管理している広島県庄原市西城町の露地ギク圃場で行った．供試光源として，第 1 章第 3 節第 3 項の同期・非同期関連実験で用いた光源と同じ試作品であり，明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を放射する LED ランプ（第 1-30 図）を用いた．無処理（0 mW･m^{-2}）区およびパルス光区の 2 区を設け，各区間に 9 m の距離を確保して，無処理区にパルス光が干渉しないようにした．パルス光区では，畝地表面からの高さが約 1.8 m の位置に 6 m の間隔で，調査対象とした植物体を取り囲むように，LED ランプを 6 個配置し，7 月 1 日～9 月 29 日までの期間，毎日 17～7 時に終夜照明した．パルス光区の点灯方式は，6 個の LED ランプを連関してパルス点灯させる同期とした．無処理区では，定植日以降を自然日長下で管理した．なお，両区での殺虫剤の使用は, ヤガ類に影響の小さい剤のみに制限し, 散布履歴を聞き取り調査した. 7 月 1 日～9 月 16 日まで 7～14 日ごとに，各区 36 株ずつ害虫による食害を調査し，食害茎率を算出した．加えて，市販されているオオタバコガおよびハスモンヨトウの性フェロモンルアーのフェロモン含量を，それぞれ 10 分の 1 に減じた専用開発品（信越化学工業製）とファネルトラップを用いて，7～14 日ごとに誘引虫数を調査した.

非同期点灯による被害防止効果と誘引虫数の低減効果

実験は，秋ギク型輪ギク‘精の旗’を 2010 年 6 月 19 日に株間 10 cm×条間 40 cm の 2 条で定植し，3 本仕立てで管理している広島県庄原市東城町の露地ギク圃場で行った．前述の西城町で

の実験と同様に，無処理（0 mW･m^{-2}）区およびパルス光区の 2 区を設け，各区間に 50 m 以上の距離を確保して，無処理区にパルス光が干渉しないようにした．パルス光区の点灯方式は，6 個の LED ランプを連関させずパルス点灯させる非同期とした．パルス光区においては，7 月 1 日～10 月 8 日までの期間，毎日 17～7 時まで終夜照明した．その他の設定条件および調査方法は，前述の西城町での実験に準じた．

2 結 果

同期点灯による被害防止効果と誘引虫数の低減効果

パルス光区における LED ランプを一時的に連続点灯させたときの畝面からの高さが 1 m の位置における放射照度は，最小 1.2 mW･m^{-2} から最大 31.4 mW･m^{-2} の範囲で分布していることを確認した（データ省略）．

パルス光区において点灯を開始した 7 月 1 日から開花（出荷）が終了した 9 月 29 日までの日最高気温は 20.7～36.6℃，日最低気温は 11.5～25.8℃で推移した（第 2-1 図）．

オオタバコガ幼虫，あるいはハスモンヨトウ幼虫によるとみられるキクの食害茎率は，無処理区と比較してパルス光区で低く推移し，9 月 16 日の最終調査日には無処理区で 40.9%，パルス光区では 9.5%となった（第 2-2 図）

オオタバコガ成虫（オス）の誘引虫数は，両区で少なく推移し，無処理区では 8 月 4 日～8 月 13 日に 1 頭であり，パルス光区では調査期間を通じて 0 頭であった（データ省略）．

ハスモンヨトウ成虫（オス）の誘引虫数は，無処理区で 8 月 13 日以降に急激に増加し，7 月 1 日から 9 月 16 の最終調査日までの合計は 837 頭となった（第 2-3 図）．パルス光区では無処理区と比較して，少なく推移し，調査期間中の合計は 413 頭となった．

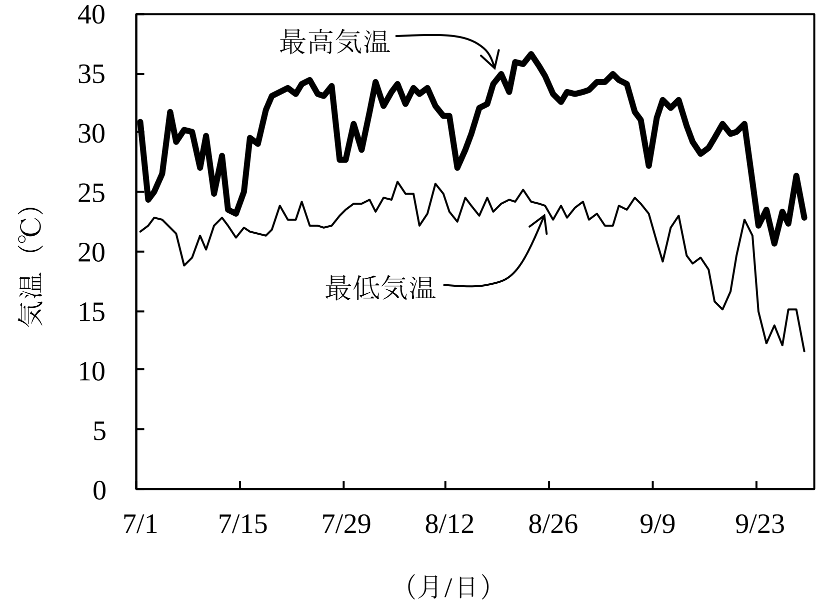
殺虫剤の散布履歴は，還元澱粉糖化物液剤が計 8 回，イミダクロプリド水和剤が計 2 回であった（第 2-3 表）．

非同期点灯による被害防止効果と誘引虫数の低減効果

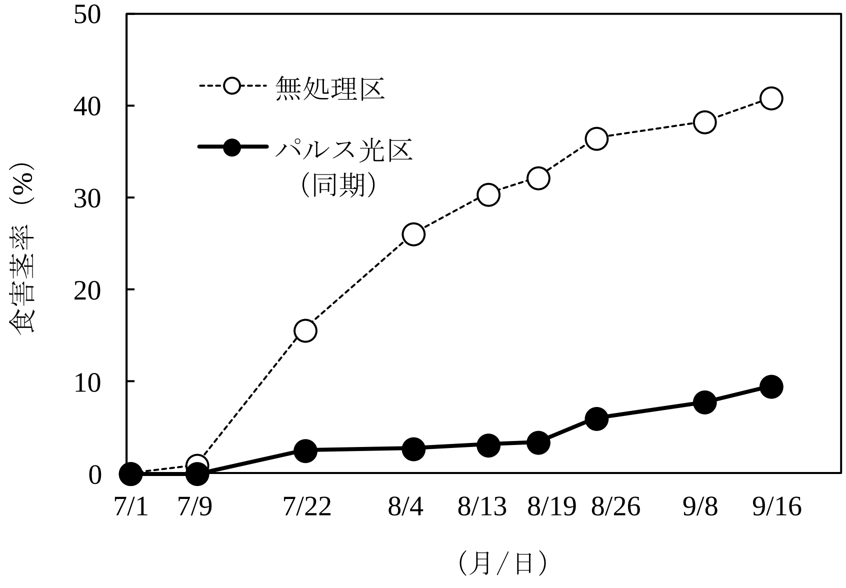
パルス光区における LED ランプを一時的に連続点灯させたときの畝面からの高さが 1 m の位置における放射照度は，最小 1.2 mW･m^{-2} から最大 36.7 mW･m^{-2} の範囲で分布していることを確認した（データ省略）．

パルス光区において点灯を開始した 7 月 1 日から開花（出荷）が終了した 10 月 8 日までの日最高気温は 17.2～34.3℃，日最低気温は 10.3～24.0℃で推移した（データ省略）．

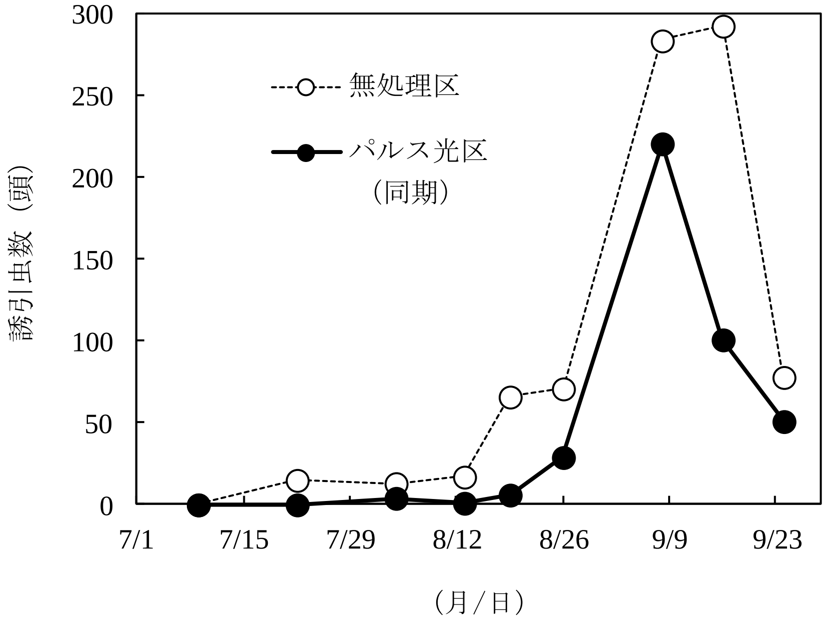
オオタバコガ幼虫，あるいはハスモンヨトウ幼虫によるとみられるキクの被害茎率は，8 月 19 日以降に無処理区と比較して，パルス光区で低く推移し，9 月 24 日の最終調査日には無処理区で 18.8%，パルス光区では 4.6%となった（第 2-4 図）．



第 2-1 図　露地ギク圃場（西城町）における気温の推移



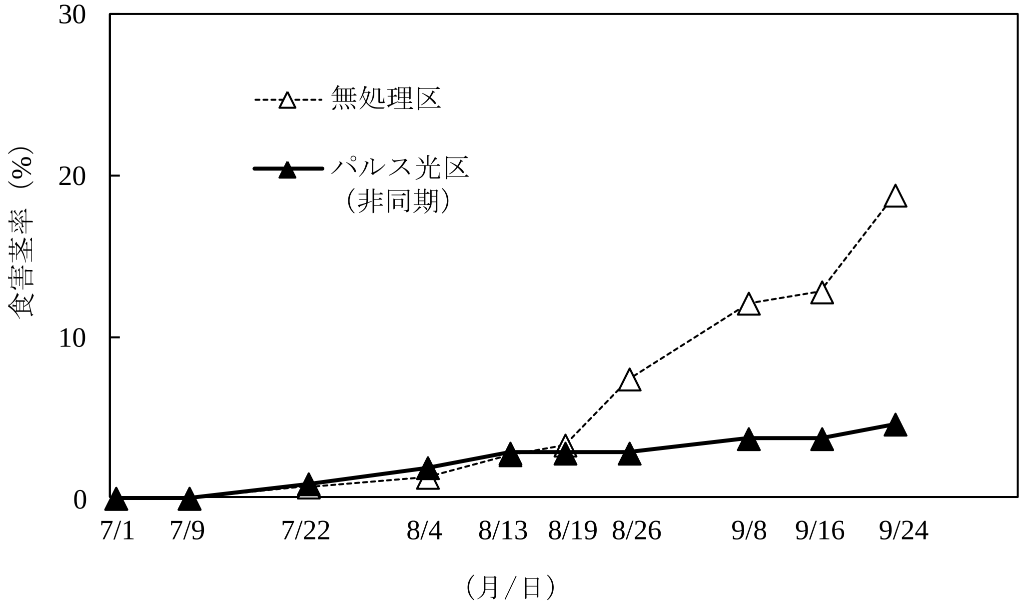
第 2-2 図　露地ギク圃場（西城町）におけるヤガ類幼虫によるとみられる食害茎率の推移



第 2-3 図　露地ギク圃場（西城町）における性フェロモントラップによるハスモンヨトウ成虫（オス）の誘引虫数の推移

第 2-3 表　露地ギク圃場（西城町）における殺虫剤の散布履歴

散布日	殺虫剤名	対 象 害 虫
7/ 4	イミダクロプリド水和剤	アブラムシ類，アザミウマ類
7/10	還元澱粉糖化物液剤	ナミハダニ，アブラムシ類
7/19	イミダクロプリド水和剤	アブラムシ類，アザミウマ類
7/25	還元澱粉糖化物液剤	ナミハダニ，アブラムシ類
8/ 3	還元澱粉糖化物液剤	ナミハダニ，アブラムシ類
8/11	還元澱粉糖化物液剤	ナミハダニ，アブラムシ類
8/25	還元澱粉糖化物液剤	ナミハダニ，アブラムシ類
9/ 1	還元澱粉糖化物液剤	ナミハダニ，アブラムシ類
9/10	還元澱粉糖化物液剤	ナミハダニ，アブラムシ類
9/18	還元澱粉糖化物液剤	ナミハダニ，アブラムシ類



第 2-4 図　露地ギク圃場（東城町）におけるヤガ類幼虫によるとみられる食害茎率の推移

オオタバコガ成虫（オス）の誘引虫数は，無処理区で 9 月 8 日以降に急激に増加し，調査期間中の合計は 15 頭となった（第 2-5 図）。無処理区と比較して，パルス光区では 8 月 4 日～8 月 13 日，9 月 8 日～9 月 24 日の期間に少なく推移し，調査期間中の合計は 6 頭となった.

ハスモンヨトウ成虫（オス）の誘引虫数は，無処理区で 8 月 13 日以降に急激に増加し，調査期間中の合計は 921 頭となった（第 2-6 図）．無処理区と比較して，パルス光区では 7 月 22 日～10 月 7 日までの期間に少なく推移し，調査期間中の合計は 70 頭となった.

殺虫剤の散布履歴は，クロチアニジン水溶剤が計 6 回，イミダクロプリド水和剤が 7 回，ミルベメクチン乳剤が 1 回であった（第 2-4 表）.

3　考　察

本実験により，取扱説明書中の対象害虫としてヤガ類の記載がない殺虫剤のみを使用した条件においても，第 1 章第 2 節においてヤガ類の視覚に対する刺激力を確認した明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光（デューティー比 20%）を放射できる LED ランプ（第 1-30 図）を用いて終夜照明した場合，ヤガ類幼虫によるとみられるキクの食害茎率を無処理（無照明）の約 4 分の 1 に，オオタバコガ成虫（オス）およびハスモンヨトウ成虫（オス）の誘引虫数を無処理と比較して低く抑えられることが明らかとなった.

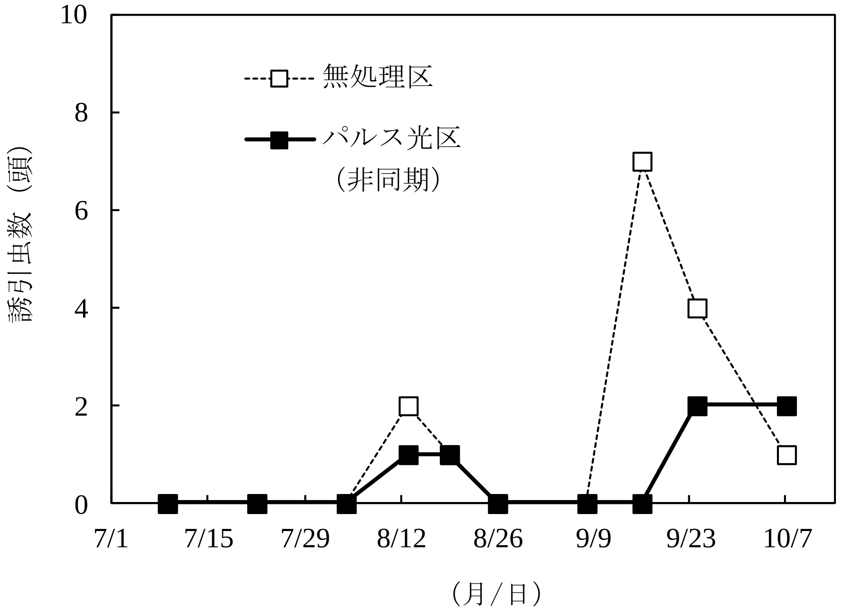
本実験では，複数個の LED ランプを連関してパルス点灯させる同期と，連関させずパルス点灯させる非同期の 2 つの点灯方式で検討した．前述したとおり，イニシャルコスト低減の観点からは点灯方式は非同期が望ましい．明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光（デューティー比 20%）の点滅周期は 10 Hz と高く，実際に同期と非同期方式でパルス点灯させて観察したところ，ヒトの視覚では，その違いを見分けることができなかったが，ヤガ類成虫は，異なる点灯方式に対して敏感に反応し，異なる行動を示すことも予想された．しかしながら，本実験では，いずれの点灯方式が優れているかを判断できる明確な結果は得られなかった．このため，今後は，屋外実験において介在する多くの不確定要素を可能な限り排除し，2 つの点灯方式を直接比較することで，両方式の有する防除効果の優劣を明らかにする必要があると考えられた.

第 2 項　開花遅延の回避

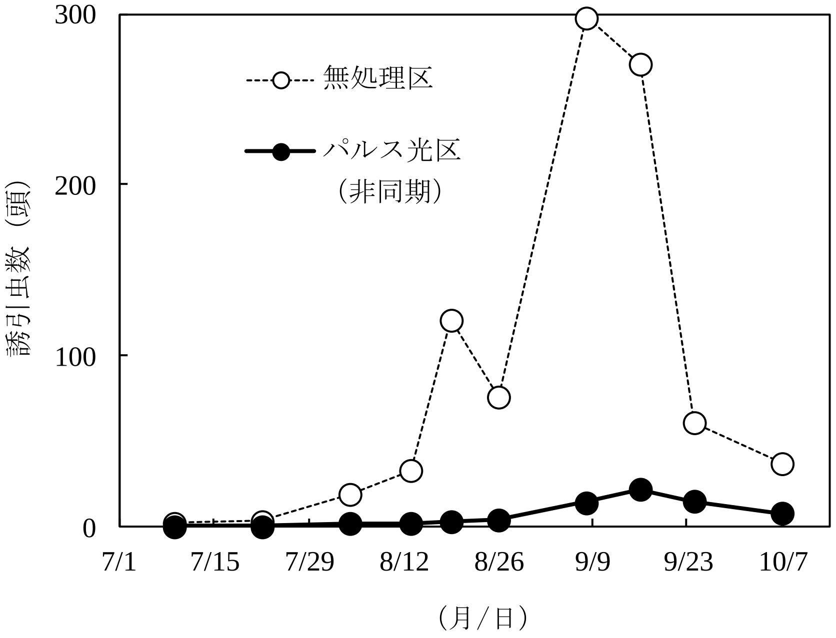
第 2 項では，第 1 項と同じ条件下の露地ギク圃場において，異なる 2 つの点灯方式が切り花ギクの草丈および蕾径に及ぼす影響を調査した.

1　材料および方法

同期および非同期点灯下での草丈および蕾径への影響



第 2-5 図　露地ギク圃場（東城町）における性フェロモントラップによる
オオタバコガ成虫（オス）の誘引虫数の推移



第 2-6 図　露地ギク圃場（東城町）における性フェロモントラップによる
ハスモンヨトウ成虫（オス）の誘引虫数の推移

第 2-4 表　露地ギク圃場（東城町）における殺虫剤の散布履歴

散布日	殺虫剤名	希釈倍率	対 象 害 虫
7/ 6	クロチアニジン水溶剤	2,000	アブラムシ類，アザミウマ類，ハモグリバエ類，カメムシ類
7/ 9	クロチアニジン水溶剤	2,000	アブラムシ類，アザミウマ類，ハモグリバエ類，カメムシ類
7/15	クロチアニジン水溶剤	2,000	アブラムシ類，アザミウマ類，ハモグリバエ類，カメムシ類
7/21	クロチアニジン水溶剤	2,000	アブラムシ類，アザミウマ類，ハモグリバエ類，カメムシ類
	ミルベメクチン乳剤	1,500	ハモグリバエ類，ハダニ類
7/28	クロチアニジン水溶剤	2,000	アブラムシ類，アザミウマ類，ハモグリバエ類，カメムシ類
8/ 5	クロチアニジン水溶剤	2,000	アブラムシ類，アザミウマ類，ハモグリバエ類，カメムシ類
8/10	イミダクロプリド水和剤	2,000	アブラムシ類，アザミウマ類
8/15	イミダクロプリド水和剤	2,000	アブラムシ類，アザミウマ類
8/24	イミダクロプリド水和剤	2,000	アブラムシ類，アザミウマ類
9/18	イミダクロプリド水和剤	3,000	アブラムシ類，アザミウマ類
9/24	イミダクロプリド水和剤	4,000	アブラムシ類，アザミウマ類

同期点灯圃場（西城町）では9月16日に，非同期点灯圃場（東城町）においては9月24日に，それぞれの圃場の無処理区およびパルス光区において，各区30枝の蕾径と草丈を調査した．

2 結 果

同期点灯下での草丈および蕾径への影響

9月16日における‘精の波’の蕾径は，パルス光区で16.1 mmとなり，無処理区の16.2 mmと比較して有意な差は見られなかった（第2-7図）．

9月16日における‘精の波’の草丈は，パルス光区で106 cmとなり，無処理区の103 cmと比較して，有意な差が見られた（第2-7図）．

開花時期は，パルス光区および無処理区ではともに9月22日～9月29日となり，大きな差は見られず，目視により確認した範囲では，切り花形質についても大きな差は見られなかった（農家からの聞き取り）．

非同期点灯下での草丈および蕾径への影響

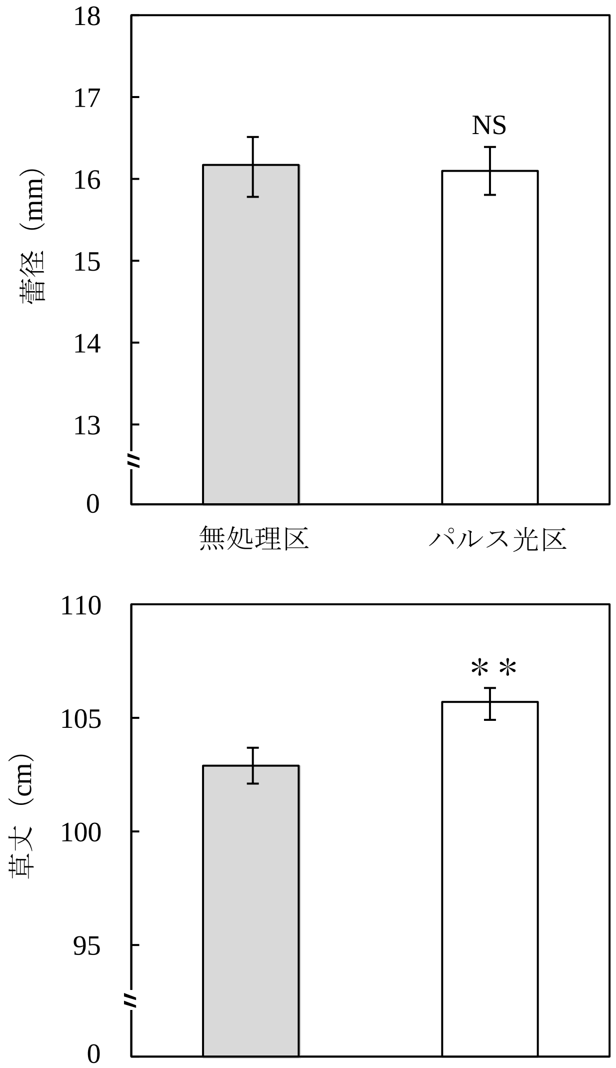
9月24日における‘精の旗’の蕾径は，パルス光区で17.4 mmとなり，無処理区の17.1 mmと比較して，有意な差は見られなかった（第2-8図）．

9月24日における‘精の旗’の草丈は，パルス光区で98 cmとなり，無処理区の100 cmと比較して，有意な差は見られなかった（第2-8図）．

開花時期は，パルス光区および無処理区ではともに9月26日～10月8日となり，大きな差は見られず，目視により確認した範囲では，切り花形質についても大きな差は見られなかった（農家からの聞き取り）．

3 考 察

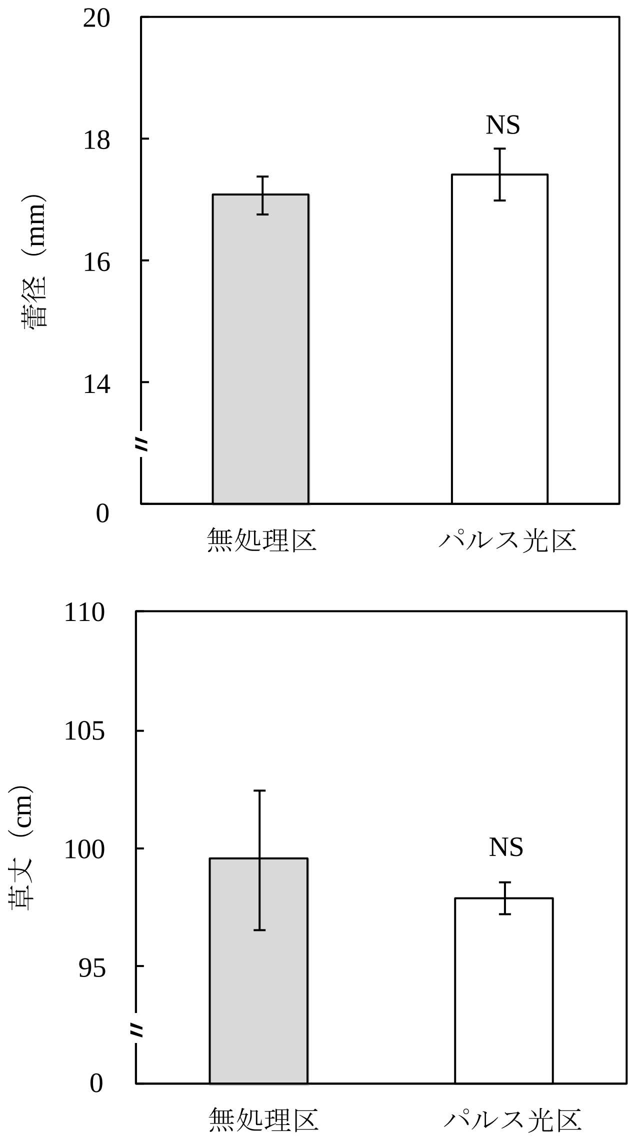
これまでに第1章で得られた知見に基づき，試作した切り花ギク用のLEDランプ（第1-30図）を，広島県北部の2箇所の露地ギク圃場において設置・点灯させ，異なる2つの点灯方式の下で，黄色パルス光の照射が切り花ギクの蕾径および草丈に及ぼす影響を調査した．その結果，複数個のLEDランプを連関させてパルス点灯させた同期においても，連関させずパルス点灯させた非同期においても，無処理およびパルス光区における蕾径の差は，‘精の波’および‘精の旗’の2品種で0.1～0.3 mm，草丈の差は2～3 cmとなった．しかしながら，これらの差は，営利栽培上の問題とならない範囲にあると考えられた．園主である農家からは，供試した両品種では，無処理区とパルス光区において，開花時期および切り花形質に大きな違いはなかったことを聴取した．このように，試作したLEDランプを一時的に連続点灯させたときの畝面からの高さが1 mの位置における放射照度を1.2～36.7 mW･m^{-2}の範囲に留めることで，蕾の発達および草丈に及ぼす黄色パ



第 2-7 図　明期 20　ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光による同期点灯が輪ギク‘精の波’の蕾径および草丈に及ぼす影響

図中の垂線は標準誤差を示す（*n* = 30）

NS は t 検定により 5%水準で有意な差がないことを，**は 1%水準で有意な差があることを示す



第 2-8 図 明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光による非同期点灯が輪ギク‘精の旗’の蕾径および草丈に及ぼす影響

図中の垂線は標準誤差を示す（n = 30）

NS は t 検定により 5%水準で有意な差がないことを示す

ルス光の照射による影響は，点灯方式に関わらず，許容範囲であると考えられ，厳密な開花制御を必要とする物日出荷などでは考慮すべき点も残されているが，営利栽培上の問題とならない程度に低減可能であると考えられた.

第 3 章　総括

多くの農作物を加害するオオタバコガおよびハスモンヨトウなどのヤガ類は，市販されている多くの化学合成農薬に対し，薬剤抵抗性を獲得しており（遠藤ら，2000；小野本ら，1996；染谷・清水，1997），難防除害虫として扱われている．キクやカーネーションなどでは，幼虫が一度花蕾に潜り込んでしまうと，散布した化学合成農薬は直接幼虫にかかりにくいため，防除を一層難しくしていると考えられる．生産現場では化学合成農薬に替わる物理的防除法の確立が望まれており，産卵のため圃場へ飛来するヤガ類の成虫に対して，高い防除効果がある黄色蛍光灯による夜間照明技術が導入されている（八瀬ら，1997）．しかし，短日植物である切り花ギクの栽培では，市販されている黄色蛍光灯を用いた夜間照明下において，著しい開花遅延を起こすことに加えて，切り花形質をも低下させてしまうため（石倉ら，2000；山中ら，1997），日長反応を示さない農作物，あるいは，照明に対し鈍感な農作物と同じように，黄色蛍光灯を利用することができなかった．

そこで，本研究では，近年，様々な用途で急速に利用拡大されつつある LED に着目し，「高い防除効果の発現」と「キクの開花遅延の回避」の 2 つを同時に満たす領域横断的な照明条件を探索することで，切り花ギクに利用可能な害虫防除技術を開発しようと試みた．なお，本研究における対象害虫は，切り花ギクを加害するヤガ類のうち，薬剤抵抗性の獲得などの理由により，難防除害虫とされているオオタバコガとハスモンヨトウとした．

まず第 1 章では，第 1 節において，人工光源を用いた従来の連続光について，ヤガ類の防除で実績のある黄色光を中心に，その他数種の光の波長および放射照度が切り花ギクの発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響を検討し，光の波長が有する開花抑制作用の強弱を調査した．その結果，同一の放射照度で比較した場合，害虫防除，あるいは開花抑制の観点から重要と考えられる黄緑，黄および赤色光照射の発蕾所要日数には，放射照度を最も低く設定した 10 mW･m^{-2} において有意な差が見られたものの，50 および 100 mW･m^{-2} では有意な差が見られなかった．また，切り花長，切り花重および切り花節数についても有意な差が見られなかった．このことから，黄緑色および黄色光の有する開花抑制作用は，最大の当該作用を有するとされる赤色光と同等であり，害虫防除用照明として，キク栽培へこれらの光を適用する場合は，これらの光が有する開花抑制作用を抑えるために，何らかの工夫が必要であることが示唆された．これまでに，赤色光を点滅させ，明期と暗期を繰り返した場合，暗期が長いほど，キクへの影響が小さいことを確認しており，黄色光による害虫防除用照明でも，明暗比率を表すデューティー比を調節することによ

って，開花への影響を制御できる可能性があると考えた．

次に第 2 節では，オオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の複眼に，放射照度 1～1000 mW･m^{-2}の黄色パルス光を照射し，網膜電位計測システムにより，防蛾の観点から，照射光の有する刺激力を解析した．ヤガ類成虫の複眼に光を照射すると，複眼内部で微弱な電圧が誘発する．網膜電位計測システムでは，誘発した電圧を増幅して解析することによって，ヤガ類成虫に対する照射光の刺激力を推定することができる．本実験では，事前の取り組み結果を踏まえて，デューティー比 20%に相当する明期 20 ms／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を採用した．なお，照射光をヤガ類成虫に「点滅している光」として視認させると，照明に対する慣れ現象を防止でき，連続光と比較して，持続性の高い防除効果が得られるとされている（平間ら，2002，2007；平間・松井，2007）．当該 2 種のヤガ類は，設定したすべての放射照度で，光点滅に追従した網膜電位信号の振幅変化を示したことから，1～1000 mW･m^{-2} の放射照度域においては，デューティー比 20%の照射光を点滅光として視認していると推察された．しかしながら，ヤガ類は，放射照度が大きいほど速い点滅を視認しにくいとされていること，さらに，当該 2 種のヤガ類の視認性は，100 mW･m^{-2} 付近を境界として変化がはじまり，300 mW m^{-2} 以上で変化が大きくなる結果が得られたことから，少なくとも 1～100 mW･m^{-2} であれば，デューティー比 20%の照射光を，点滅光として常時安定的，かつ持続的に視認させることができると考えられた．

続く第 3 節では，まず異なるデューティー比の黄色パルス光の照射が秋ギクの発蕾に及ぼす影響を明らかにすることで，夜間照明による影響を軽減する上で重要となるパルス化の有効性を検証した．その結果，黄色光をパルス化して照射した場合，デューティー比が小さいほど，生育への影響も小さくなった．照明時のキク茎頂付近の放射照度を 40 mW･m^{-2} とした場合，デューティー比が 9.1 および 16.7%であれば，秋ギク‘神馬’の発蕾，開花および切り花形質に有意な影響を及ぼすことなく適用できることが明らかとなった．また，放射照度が 40 mW･m^{-2} の場合，秋ギク‘神馬’に有意な影響を及ぼすことなく適用できるデューティー比の上限値は 16.7～50%に存在することが示唆され，キクに対する黄色光照射の影響を軽減するためには，少なくとも 50%より小さいデューティー比によるパルス化の有効性が検証できた．

そこで，第 2 節の結果も踏まえ，デューティー比 20%の黄色パルス光を，切り花の形状が異なる合計 19 品種の輪ギク，小ギクおよびスプレーギクに対し，異なる放射照度で照射した場合の発蕾，開花および切り花形質に及ぼす影響を調査した．その結果，切り花ギクについて，営利栽培上の問題となるような大きな影響を及ぼすことなく適用できる放射照度の範囲が存在することが明らかとなった．また，黄色パルス光が適用できる放射照度の上限値は，黄色の連続光と比較して，大きいことが明らかとなった．黄色光をパルス化することで，適用可能な放射照度の範囲が拡大できることは，開発した防蛾照明技術を具現化する LED ランプの配光性を決定する上で重要であり，加えて，キク圃場における照明設計を行う上でも重要な知見を得ることができた．

また，第 3 節第 3 項においては，実際の栽培での利用を想定した点灯方式である同期および非

同期点灯下における切り花ギクへの影響を検討するとともに，近い将来，性能がさらに向上したLEDが，より安価に入手可能となることを想定し，一般照明用のLEDシーリングライトなどではすでに実用化されているPWM点灯下における切り花ギクへの影響について検討した．その結果，畝面からの高さが1 mの位置の放射照度が9～16 mW･m^{-2}の場合，いずれの点灯方式においても，秋ギク‘神馬’の到花日数および切り花形質について，営利栽培上の問題は発生しないことが明らかとなった．また，連続光による終夜照明と同様に，デューティー比50%のPWM周波数1 kHzによる終夜照明は，一定以上の放射照度を確保することで，電照抑制栽培への適用が可能であることが示され，キクの成長に合わせた調光管理実現の可能性を示すことができた．なお，PWM点灯制御によって，キクの成長に合わせた調光管理が実現できた場合，一層の節電照明が可能となることに加えて，栄養成長期と生殖成長期に適用する放射照度を自在に制御することで，積極的な開花抑制と，害虫に対する行動制御との使い分けが可能となると考えられる．

第2章では，これまでに第1章で得られた知見に基づき，切り花ギク用のLEDランプを試作し，露地ギク栽培へ導入して，害虫防除効果と開花への影響の両面から検討した．その結果，黄色パルス光を照射すると，無照明と比較して，オオタバコガ幼虫，あるいはハスモンヨトウ幼虫によると見られる食害茎率を約4分の1に軽減でき（第2-2および2-4図），開花および切り花形質についても，営利栽培上の問題となる影響は見られない（第2-7および2-8図）ことを検証できた．

以上のことから，本研究で開発した黄色LEDパルス光を用いた害虫防除技術は，切り花ギク栽培において高い実用性を有することを示すことができた．

今後は，関連企業と連携しつつ，圃場での利用を想定した紫外線対策，防雨防湿性能の付与などの耐候性強化を含む，製品化に向けた諸課題の解決に積極的に取り組むことで，本研究の開発技術を具現化するLEDランプの早期商品化を目指したいと考えている．

謝辞

本論文をまとめるにあたり，岡山大学大学院環境生命科学研究科教授の後藤丹十郎博士には，常に懇切丁寧，かつ熱意のこもったご指導を賜った．本研究の一部は，農林水産省　新たな農林水産政策を実現する実用技術開発事業を活用し，研究課題名「キクのエコ生産を実現するLEDを用いた防蛾照明栽培技術」の一環として実施したが，後藤博士には，当該研究の実施および取りまとめにあたり，外部有識者として，研究全体を俯瞰した的確なご高閲を賜った．ここに記し，深く感謝の意を表す．岡山大学大学院環境生命科学研究科教授の吉田裕一博士には，キクの開花制御の観点から，ご指導とご鞭撻を賜った．岡山大学大学院環境生命科学研究科教授の宮竹貴久博士には，昆虫の行動制御の観点から，ご指導とご鞭撻を賜った．ここに記し，厚く感謝の意を表す．岡山大学大学院自然科学研究科名誉教授の桝田正治博士，元　岡山大学環境生命科学研究科准教授の村上賢治博士（現　石川県立大学教授），岡山大学大学院環境生命科学研究科助教の田

中義行博士には，多くの有益な示唆と暖かい激励を賜った．ここに記し，深謝する．

本研究の一部は，筆者が広島県立総合技術研究所農業技術センターに勤務しつつ，岡山大学大学院自然科学研究科に在籍して実施した．社会人としての大学在籍にあたって，特に寛大なご配慮をいただいた広島県立総合技術研究所農業技術センター長の新田浩通氏，栽培研究部 部長の前田光裕氏および栽培研究部 副部長の梶原真二博士には，厚く感謝の意を表する．

元　広島県立総合技術研究所農業技術センター技術支援部長の那波邦彦博士，今井俊治博士，林　英明氏（現 出光興産株式会社　アグリバイオ事業部）および元　広島県立総合技術研究所農業技術センター技術支援部担当部長の勝谷範敏博士には，研究者としての心構えに加え，情熱をもって研究に取り組むことの大切さをご教示いただいた．また，前述した研究課題名「キクのエコ生産を実現する LED を用いた防蛾照明栽培技術」に関し，その研究企画段階では，害虫防除，開花生理および生態情報の活用など，高い見識と豊富な経験に基づき適切にご指導いただいた．

金沢工業大学工学部教授の平間淳司博士，千葉大学大学院園芸学研究科准教授の野村昌史博士および尹　丁梵博士（現　大韓民国 農村振興庁 国立農業科学院），元　兵庫県立農林水産技術総合センター主任研究員の岩井豊通氏，兵庫県立農林水産技術総合センター主席研究員の二井清友氏，主任研究員の東浦　優および主席研究員の山中正仁博士，シャープ株式会社電子デバイス事業本部参事の小西勝之氏，副参事の渡辺昌規氏，主任の細野幸治氏，元　シャープ株式会社電子デバイス事業本部係長の吉村文敏氏（現　高槻電器工業株式会社　営業部営業課　課長），広島県立総合技術研究所農業技術センター生産環境研究部副主任研究員の山下真二氏（現　広島県立総合技術研究所東部工業技術センター 技術支援部主任研究員）には，共同研究者として本研究を支えて頂いた．

本研究を実施するにあたり，独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構花き研究所主任研究員の道園美弦博士，和歌山県農林水産総合技術センター農業試験場暖地園芸センター主査研究員の島　浩二博士（現　和歌山県日高振興局 地域振興部 農業振興課），奈良県農業総合センター花き栽培チーム総括研究員の仲　照史氏および岡山県農林水産総合センター農業研究所野菜・花研究室専門研究員の森　義雄氏には，電照に対する既存の小ギク品種の反応特性に関する知見や，花房型の評価方法に関する知見など，多くの関連情報をご提供頂いた．また，沖縄県農業研究センターからは，同県の育成品種である‘沖の乙女’および‘沖ピンク’をご分譲いただいた．ここに記し，感謝の意を表す．

広島県立総合技術研究所農業技術センター栽培技術研究部副主任研究員の原田秀人氏および福島啓吾氏，広島県立総合技術研究所農業技術センター技術支援部副主任研究員の大川浩史氏（現　広島県立総合技術研究所食品工業技術センター技術支援部担当部長）および水主川桂宮氏には，本研究の実施にあたり多大なご協力を頂いた．また，広島県立総合技術研究所農業技術センター管理課の齋藤廣司氏および山元行成氏，元 管理課職員の山口正昭氏，故　平河日登志氏，宮本芳則氏および山田　勉氏には，日々の栽培管理の支援や実験装置の製作において多大なご協力を頂

いた．岡山大学農学部作物開花制御学研究室の皆様には，本研究の取りまとめにあたり多くのご協力を頂いた．そして，広島県庄原市西城町の竹森義教氏および同市東城町の高柴順紀氏には，現地実証実験の実施と取りまとめにあたり多大なご協力を頂いた．ここに記し，深く感謝の意を表す．

引用文献

赤松幸佳・Hennayake・金地通生・宇野雄一・稲垣　昇．2004．色変わりバラの開花に伴う紫外線受光の差異がアントシアニン生合成に及ぼす影響．園学雑 73（別 2）: 226.

審良昌紀・三木良太・平間淳司・松井良雄・得永嘉昭・會澤康治・石倉　聡. 2009．黄色 LED を用いたパルス光による害虫防除装置の開発 ― 切り花菊の開花阻害と防除効果との関係 ―．日本生物環境工学会 2009 年福岡大会講演要旨. 10-11.

Cathey, H.M. and H.A.Borthwick. 1957. Photoreversibility of floral initiation in chrysanthemum. Bot. Gaz. 119: 71-76.

Cathey,H.M.and H.A.Borthwich. 1961. Cyclic lighting for controlling flowering of *Chrysanthemum*. Proc.Amer.Soc.Hort.Sci. 78: 545-552.

Cathey, H.M. and H.A.Borthwick. 1964. Significance of dark reversion of phytochrome in flowering of *Chrysanthemum morifolium*. Bot.Gaz. 125: 232-236.

道園美弦・久松　完・大宮あけみ・市村一雄・柴田道夫. 2012．低温期のスプレーギク施設栽培における EOD-heating の有効性．園学研. 11: 505-513.

江口英輔．1995．複眼は何をどのように見ているか．p．67-68．冨永佳也編．昆虫の脳を探る．共立出版．東京.

江村　薫. 2003．光による昆虫管理（誘引と行動抑制）. p. 9-14．生態工学会企画委員会編集．生態工学シンポジウム論文集．ポプラ社．埼玉.

遠藤正樹・加藤浩生・清水喜一．2000．千葉県におけるタバコガ類の発生状況と薬剤感受性．関東東山病害虫研究会報．47: 129-131.

船越桂市. 1989．開花調節技術．船越桂市編．切り花栽培の新技術 改訂キク上巻. p. 28-45．誠文堂新光社．東京.

フローリスト編集部. 1983．花の切り前．フローリスト編集部編. p. 4-33．誠文堂新光社．東京.

後藤英司．2006．第 3 章 LED と植物育成．社団法人 農業電化協会編．時代を先取りする先端技術 LED の農林水産分野への応用. p. 35-49．社団法人 農業電化協会編．東京.

服部一三. 1991．キクのカロチノイドによる花色の遺伝．育学雑. 41: 1-9.

東尾久雄・廣野久子・佐藤文生・徳田進一・浦上敦子. 2009．ブラックライト蛍光ランプの照射がイチゴ果実の着色および果実硬度に及ぼす影響．園学研. 8: 503-507.

平間淳司・荒永　誠・中出智己・宮本紀男・藪　哲男・伊澤宏毅. 2002. 超高輝度型の発光ダイオード（LED）によるヤガ・カメムシ類の防除装置の開発－光刺激の波長およびパルス光の網膜電位（ERG 信号）応答特性－. 農業機械学誌. 64: 76-82.

平間淳司・松井良雄. 2007. 黄色 LED 光源を用いた物理的害虫防除－ヤガ類に対する有効性の検討－. 植物防疫. 61: 503-507.

平間淳司・関　憲一・細谷直輝・松井良雄. 2007. 黄色 LED 光源を用いた物理的害虫防除装置の試作－ヤガ類の行動観察結果－. 植物環境工学. 19: 34-40.

本田健一郎. 2010. 光源利用の実際－植物の害虫防除－. p. 117-121. 後藤英司編著. 人工光源の農林水産分野への応用. 農業電化協会. 東京.

洞口公俊・村上克介・向阪信一. 1997. 植物生産効率化のための光放射利用. 照明学会誌. 81: 581-585.

井水清智･本林成元. 2001. 暗期中断電照による八月咲き小ギクの開花調節に関する研究（第 2 報）暗期中断電照が八月咲き小ギクの草姿に及ぼす影響. 園学雑. 70（別 1）: 143.

石倉　聡. 2000. 秋ギク栽培における防蛾用黄色蛍光灯の設置基準. 近畿中国地域における新技術. 35: 124-127.

石倉　聡・福島啓吾・那波邦彦. 2000. 防蛾用黄色蛍光灯による終夜照明が秋ギクの開花に及ぼす影響. 近畿中国農業研究. 100: 50-54.

石倉　聡・後藤丹十郎・山下真一・梶原真二・平間淳司・野村昌史・尹　丁梵. 2012a. 黄色蛍光 LED の PWM 周波数が秋ギク‘神馬’の発蕾, 開花および切り花形質に及ぼす影響. 園学研. 11（別 1）: 174.

石倉　聡・後藤丹十郎・山下真一・梶原真二・平間淳司・野村昌史・尹　丁梵. 2012b. 秋ギクにおける害虫防除効果，蕾径および草丈に及ぼす黄色 LED ランプのパルス照明の影響. 園学研. 11（別 2）: 263.

石倉　聡・平間淳司・野村昌史・山下真一・東浦　優・岩井豊通・二井清友・山中正仁. 2010. 黄色 LED パルス光を用いた秋ギクの害虫防除光源装置の開発－開花の遅延を回避できる光照射技術－. 植物環境工学. 22: 167-174.

石倉　聡・梶原真二・原田秀人・福島啓吾. 2009. キクの電照抑制栽培に用いる白熱電球代替光源としての電球形蛍光灯および LED の光エネルギー特性と開花抑制効果. 広島総研農技セ研報. 84: 1-6.

石倉　聡・梶原真二・原田秀人・福島啓吾・後藤丹十郎. 2011. 秋ギクの電照抑制栽培における黄色 LED の発蕾抑制効果.園学研. 10（別 2）: 614.

石倉　聡・向阪信一・福島啓吾. 1998. 分光分布の異なる光源による照明が秋ギクの開花に及ぼす影響. 日本植物工場学会平成 10 年度学術講演要旨集. 82-83.

石倉　聡・村上克介. 2006. 赤色光 LED を用いた間欠照明における暗期幅が秋ギクの開花に及ぼ

す影響. 園学雑. 75（別 2）: 386.
伊澤宏毅・渡辺博幸・弘田憲史. 2000. 環形黄色蛍光灯‘撃退くん’を利用したナシ果実吸蛾類の防除法. 鳥取果試研報. 4: 1-11.
甲斐和広・近藤　直・林　孝洋・芝野保徳・小西国義・門田充司. 1995. スプレーギクの花房フォーメーションの評価アルゴリズムに関する研究（第 1 報）－着花位置を決定する特徴量の抽出－.生物環境調節. 33: 253-259.
河本康太郎. 1992. 昆虫と光放射. p. 67-73. 社団法人 照明学会編書. 光バイオインダストリー－光応用による生物反応の制御－. オーム社. 東京.
川田穣一・船越桂市. 1988. キクの生態的特性による分類. 農業および園芸. 63: 985-990.
木村喜久夫. 1974. 施設ギクの周年切り花生産. p. 131-132. 誠文堂新光社. 東京.
森　義雄・小川浩太郎・鴻野信輔. 2007. 夏秋小ギクの開花時期及び切り花品質に対するエセフォンとジベレリンの併用効果. 岡山農試研報. 25: 61-64.
那波邦彦・向阪信一. 1995. 黄色蛍光灯によるスイートコーンのアワノメイガの被害軽減. 応動昆中国支会報. 37. 19-24.
Nakagawa T., Eguchi E. 1994. Difference in flicker fusion frequencies of the five spectral photoreceptor types in the swallowtail butterfly’s compound eye. Zool Sci.,11: 759-762.
農林水産省. 2013a. 花き流通統計調査報告. 主要卸売市場の年間・月別卸売数量、卸売価額及び卸売価格（平成 20 年）. ＜ http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaki_orosi/index.html ＞.
農林水産省. 2013b. 農林水産統計. 平成 24 年度産花きの作付（収穫）面積及び出荷量. ＜ http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kaki/pdf/sakutuke_kaki_12s.pdf ＞.
岡田正順. 1963. 菊の花芽分化および開花に関する研究.東京教育大農紀要. 9: 87-97.
小野本徳人・根来淳一・柴尾　学・田中　寛. 1996. 人工飼料浸漬法によるオオタバコガの薬剤殺虫効果. 関西病虫研報. 38: 23-24.
島内円夏・上和田秀美・福田　健・津田勝男・坂巻祥孝・櫛下町鉦敏. 2010. 性フェロモントラップによるハスモンヨトウ成虫（オス）の捕獲に対する風速の影響. 南太平洋研究. 30: 13-21.
染谷　淳・清水喜一. 1997. 千葉県におけるオオタバコガの発生生態と薬剤感受性. 関東東山病害虫研報. 44: 241-248.
田中　寛・溝淵直樹・向阪信一・柴尾　学・上田昌弘・木村　裕. 1992. 黄色蛍光灯によるオオバに寄生するハスモンヨトウの防除. 関西病虫害研報. 34: 47-48.
谷　善平. 2000. オプト・デバイス入門. p. 23. 谷　善平編著. 新版　オプト・デバイス応用ノウハウ. CQ 出版.東京.
田澤信二. 2001. 害虫行動を制御する黄色ランプ. 照明学会誌. 85: 217-221.
内田一秀. 2002. 黄色高圧ナトリウムランプによるスイートコーンのオオタバコガ防除. 農業電化. 55: 18-22.

内田正人・福田博年・宇田川英夫. 1978. ナシを加害する果実吸蛾類の生態と防除に関する研究. 鳥取果試研報. 8: 1-29.

藪　哲男. 1999. 発光ダイオードを利用した害虫防除技術 － 黄色夜間照明がオオタバコガの行動に及ぼす影響を中心にして －. 植物防疫. 53: 209-211.

山中正仁・廣瀬敏晴・岩井豊通. 2006. 緑色蛍光灯による 9 月咲きギクのオオタバコガ防除効果と開花への影響. 近中四農研. 8: 8-11.

山中正仁・八瀬順也・宇田　明・藤井　紘. 1997. 防蛾用黄色蛍光灯がカーネーションとキクの生長および開花に及ぼす影響. 近中農研. 93: 71-75.

矢野貞彦. 1992. 防蛾灯によるシロイチモジヨトウの防除. 関西病虫害研報. 34: 97.

八瀬順也. 2003. 黄色灯による害虫管理－花き，野菜類のガ類を中心として－. p. 27-32. 生態工学会企画委員会編集. 生態工学シンポジウム論文集. ポプラ社. 埼玉.

八瀬順也. 2004. 黄色灯による害虫管理－花き, 野菜類のガ類を中心として－. 話題の新技術 黄色灯による農業害虫防除. 江村　薫ら編. p. 33-45. 社団法人 農業電化協会. 東京.

八瀬順也・九村俊幸・向阪信一. 1996. 黄色蛍光灯によるカーネーションのタバコガ・ヨトウムシ類に対する被害軽減効果. 応動昆中国支部会報. 38: 1-7.

八瀬順也・山中正仁・藤井　紘・向阪信一. 1997. 黄色蛍光灯によるカーネーション，バラ，キクのタバコガ・ヨトウムシ類防除技術. 近中農研. 93: 10-14.

米村浩次. 1993. 農業技術大系花卉編 1－生長・開花その調節－. p. 147-153. 農文協. 東京.

尹　丁梵・野村昌史・石倉　聡. 2010. LED 照明技術を利用したオオタバコガの飛翔行動抑制効果. 第 54 回応動昆大会講演要旨集. 196.

尹　丁梵・野村昌史・石倉　聡. 2012. 黄色 LED 点滅光によるオオタバコガの飛翔抑制. 日本応動昆. 56: 151-156.

尹　丁梵・野村昌史・石倉　聡・山下真一. 2011. LED 照明技術を利用したハスモンヨトウの飛翔行動抑制効果. 第 55 回応動昆大会講演要旨集. 213.